



**Aalto-yliopisto**  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

Sven-Åke Stenberg

## **Tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien tekniis-taloudellinen optimointi**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.11.2015

Valvoja: Professori Kai Sirén

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Petteri Hajanti

---

**Tekijä** Sven-Åke Stenberg

---

**Työn nimi** Tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien teknis-taloudellinen optimointi

---

**Koulutusohjelma** Energia- ja LVI-tekniikan koulutusohjelma

---

**Pää-/sivuaine** LVI-tekniikka**Koodi** K3008

---

**Työn valvoja** Professori Kai Sirén

---

**Työn ohjaaja** Diplomi-insinööri Petteri Hajanti

---

**Päivämäärä** 30.11.2015**Sivumäärä** 89**Kieli** suomi

---

Tässä diplomityössä tutkitaan tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia. Työn tavoitteena on löytää järjestelmävaihtoehdoista teknis-taloudellisesti paras tapa hyödyntää tietokonesalin hukkalämpöä. Tässä työssä tutkitaan myös hukkalämmön hyödyntämisen vaikutusta tietokonesalin energiatehokkuuteen ja energiatehokkuuden mittareihin.

Tässä työssä saadut tulokset perustuvat tietokonesalista tehtyyn simulointimalliin ja malliin yhdistettyyn optimointiin. Optimoinnin avulla ratkaistaan myös kylmäkäytävän lämpötilan, kuumakäytävän lämpötilan, jäähdytyksen menoveden lämpötilan sekä jäähdytyksen meno- ja paluulämpötilan eron optimaaliset asetusravot sekä tutkitaan muuttujien vaikutusta järjestelmän elinkaarikustannuksiin.

Saatujen tulosten perusteella elinkaarikustannuksiltaan edullisin vaihtoehto on järjestelmä, jossa hukkalämpö hyödynnetään kaukolämpöverkon lämpötilan mukaan kesäisin kaukolämpöverkon menopuolelle ja talvisin paluupuolelle. Elinkaarikustannuksiltaan edullisimmalla vaihtoehdolla saavutetaan yli 4,2 miljoonan euron säästöt elinkaarikustannuksissa verrattuna referenssitapaukseen, jossa jäähdytys tuotetaan vapaajäähdytystä hyödyntävillä vedenjäähdytyskoneilla. Elinkaarikustannuksiltaan edullisimmassa tapauksessa pelkän jäähdytysjärjestelmän elinkaarikustannukset ovat 63 % referenssitapausta pienemmät.

Energiatehokkuutta mittaavat ERE ja ERF -arvot ovat kaikissa lämpöpumppuratkaisuissa merkittävästi paremmat kuin referenssitapauksessa, sillä ERE ja ERF huomioivat hukkalämmön hyödyntämisen energiatehokkuutta parantavana tekijänä. Sen sijaan lämpöpumpuilla toteutetun järjestelmän PUE -arvo on referenssitapausta huonompi, sillä PUE ei huomioi hukkalämmön hyödyntämistä.

Malleissa, joissa hukkalämpö hyödynnetään lämpöpumpun avulla kaukolämpöverkkoon, kylmäkäytävän lämpötila kannattaa asettaa 19-20 °C, kuumakäytävän lämpötila 34-35 °C, jäähdytyksen menoveden lämpötila 15-17 °C ja jäähdytyksen meno- ja paluuveden lämpötilaero 9-10 °C asetusravoon.

---

**Avainsanat** tietokonesali, hukkalämpö, lämpöpumppu, talteenotto, PUE, ERE

---

---

**Author** Sven-Åke Stenberg

---

**Title of thesis** Technical and economical optimization of data center waste heat utilization

---

**Degree programme** Energy and HVAC-Technology

---

**Major** Heating Ventilating and Air-Conditioning**Code** K3008

---

**Thesis supervisor** Professor Kai Sirén

---

**Thesis advisor** Petteri Hajanti, M. Sc. (Tech.)

---

**Date** 30.11.2015**Number of pages** 89**Language** Finnish

---

This master's thesis studies data center waste heat recovery possibilities. The aim is to discover the technically and economically best way to utilize the waste heat from a data center. This paper also investigates the effect of the waste heat utilization on data center energy efficiency and energy efficiency indicators.

The results of this work are based on a simulation model and on optimization combined to the model. Optimization solves the optimal temperature set points of cold aisle, hot aisle, cooling water supply temperature and the temperature difference between cooling water supply and return temperature. Optimization is also used to study the effect of variables on the life-cycle-costs of the system.

Based on the results, the least expensive option is a system where the waste heat is utilized in district heating network to supply or return side according to the outside temperature. The most economical option provides savings of more than 4,2 million euros compared to the reference case in which the cooling is produced by chillers that use free cooling. The life-cycle-costs of the most economical cooling system are 63 % lower than in the reference case.

ERE and ERF values, that are used to measure the energy efficiency of a data center, are significantly better in cooling solutions based on heat pumps than in the reference case, because ERE and ERF also note the waste heat utilization as a factor improving the energy efficiency. The PUE value of the optimized system is worse than in the reference case, because PUE does not account the utilization of waste heat.

In models that use heat pump to utilize waste heat to district heating, the cold aisle temperature should be set to 19-20 °C, the hot aisle temperature to 34-35 °C, the cooling water supply temperature to 15-17 °C and the temperature difference between cooling water supply and return to 9-10 °C.

---

**Keywords** data center, waste heat, heat recovery, heat pump, PUE, ERE

---

## **Alkusanat**

Tämä diplomityö on tehty Granlund Oy:lle. Työn valvojana toimi LVI-tekniikan professori Kai Sirén Aalto-yliopiston energiatekniikan laitokselta. Työn ohjaajana toimi diplomi-insinööri Petteri Hajanti Granlund Oy:n konesaliryhmästä.

Tämä diplomityö on viimeinen opintosuoritukseni matkalla diplomi-insinöörin tutkintoon. Opintoni Aalto-yliopistossa ovat olleet kehittäviä, monipuolisia ja mielenkiintoisia.

Kiitän Granlund Oy:tä, esimiestäni Jari Innasta sekä työn ohjaajaa Petteri Hajantia kiinnostavasta ja opettavaisesta diplomityöaiheesta! Esitän kiitokset myös diplomityön valvojana sekä pääaineeni vastuuprofessorina toimineelle professori Kai Sirénille. Lisäksi haluan kiittää IDA ICE -simulointiohjelmiston käyttämisen mahdollistanutta Mika Vuolletta kärsivällisestä opastuksesta ja tuesta simulointimalliin liittyvissä tilanteissa.

Suurimmat kiitokset haluan esittää opiskelijayhteisölle ja vanhemmilleni, veljilleni sekä ystävilleni, jotka ovat tukeneet ja olleet mukana meiningissä opintojeni aikana, ennen niitä ja niiden jälkeen.

Helsingissä 30.11.2015

**Åke Stenberg**

# Sisällysluettelo

Alkusanat.....	
Käytetyt lyhenteet.....	
1 Johdanto .....	1
1.1 Diplomityön taustaa.....	1
1.2 Diplomityön tutkimuskysymykset.....	1
1.3 Diplomityön tavoitteet ja rajausta .....	2
1.4 Kirjallisuuskatsauksen lähdemateriaali.....	3
2 Tietokonesalit .....	5
2.1 Tietokonesalien jäähdytystarve ja ohjeavot .....	7
2.2 Jäähdytyksen tuotantotavat .....	12
2.2.1 Koneellinen jäähdytys ja vapaajäähdytys .....	12
2.2.2 Kaukojäähdytys .....	14
2.3 Konesalin jäähdytys.....	15
2.3.1 Ilmajäähdytys .....	15
2.3.2 Nestejäähdytys.....	21
2.3.3 Korkeamman lämpötilan nestejäähdytys .....	22
2.3.4 Kaksifaasijäähdytys .....	22
3 Hukkalämmön hyödyntäminen .....	24
3.1 Hukkalämmön määritelmä .....	24
3.2 Nykytilanne ja edellytykset hyödyntämiselle .....	24
3.3 Hyödyntäminen lämmityksessä tai lämpimän käyttöveden tuotannossa .....	25
3.3.2 Hyödyntäminen kaukolämpöverkkoon.....	30
3.3.3 Hajautettu lämmöntuotanto tietokonesalien avulla .....	34
3.4 Hyödyntäminen höyryturbiinivoimalaitoksessa.....	34
3.5 Hyödyntäminen absorptiojäähdytyksessä .....	35
3.6 Hyödyntäminen ORC-prosessissa .....	36
3.7 Hyödyntäminen pietsosähkön tuottamisessa.....	37
3.8 Hyödyntäminen termosähkön tuotannossa .....	38
3.9 Hyödyntäminen veden suolanpoistossa .....	39
3.10 Hyödyntäminen biovoimalaitoksissa.....	40
4 Konesalin energiatehokkuuden mittarit .....	41

4.1	PUE eli Power Usage Effectiveness .....	41
4.1.1	pPUE eli Partial Power Usage Effectiveness .....	42
4.2	ERE eli Energy Reuse Effectiveness .....	42
4.2.1	ERF eli Energy Reuse Factor .....	43
4.3	Muut energiatehokkuuden mittarit .....	44
4.3.1	DCIE eli Data Center Infrastructure Efficiency .....	44
4.3.2	DCNE eli Data Center Net Efficiency .....	44
4.3.3	CADE eli Corporate Average Data Center Efficiency .....	44
4.3.4	Energiatiheys .....	46
4.3.5	CUPS eli Computer Units per Second .....	46
5	Diplomityön menetelmät ja käytettävät ohjelmistot .....	47
5.1	Optimointi .....	47
5.2	Talouselaskenta .....	47
5.3	IDA ICE .....	49
5.4	MOBO .....	50
5.5	Optimointiongelmien .....	51
6	Esimerkkikohta ja mallintaminen .....	53
6.1	Vapaajäähdytys + CRAH, ei hukkalämmön hyödyntämistä .....	56
6.2	Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpun avulla kaukolämpöverkkoon .....	57
6.2.1	Hyödynnettävä hukkalämpö myydään energiayhtiölle .....	57
6.2.2	Energiayhtiö kustantaa lämpöpumppujen investoinnin ja ylläpidon... .....	60
6.3	Lähtötiedot ja oletukset .....	61
6.3.1	Talouselaskennan lähtötiedot .....	61
6.3.2	Tekniset lähtötiedot ja oletukset .....	65
7	Tutkimustulokset .....	67
7.1	Hukkalämmön hyödyntämisen vaikutus energiatehokkuuden mittareihin. .....	68
7.1.1	PUE .....	68
7.1.2	ERE .....	70
7.1.3	ERF .....	72

7.1.4	Vaikutus muihin energiatehokkuuden mittareihin .....	72
7.2	Hukkalämmön hyödyntämisen vaikutus elinkaarikustannuksiin .....	73
7.3	Muuttujien vaikutus elinkaarikustannuksiin .....	75
7.3.1	$T_{ca}$ kylmäkäytävän lämpötila.....	75
7.3.2	$T_{ha}$ kuumakäytävän lämpötila.....	76
7.3.3	$T_{cws}$ jäähdytyksen menoveden lämpötila .....	77
7.3.4	$\Delta T_{cw}$ jäähdytyksen paluu- ja menoveden lämpötilaero.....	78
8	Johtopäätökset .....	81
	Lähteet.....	82

## Käytetyt lyhenteet

ASHRAE	<i>The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> , yhdysvaltalainen LVI -alan järjestö.
CADE	<i>Corporate Average Data Center Efficiency</i> , energiatehokkuuden mittari, joka ottaa huomioon myös infrastruktuurin ja tietotekniikan käyttöasteen.
CHP	<i>Combined heat and power</i> , sähkön ja lämmön yhteistuotanto on energian tuotantomuoto, jossa samassa prosessissa tuotetaan samanaikaisesti sähkön lisäksi lämpöä.
COP	<i>Coefficient of Performance</i> , lämpökerroin.
CRAH	<i>Computer room air handler</i> . Tietokonesalin vakioilmastointikone.
CUPS	<i>Computer Units per Second</i> . Tietotekniikkalaitteiston normitettu laskentateho jaettuna sähköteholla
DCIE	<i>Data Center Infrastructure Efficiency</i> , tietokonesalien energiatehokkuutta kuvaava luku: tietotekniikkalaitteiston kulutus verrattuna tietokonesalin kokonaisenergian kulutukseen. PUE:n käänteisluku.
DCNE	<i>Data Center Net Efficiency</i> , tietokonesalien energiatehokkuutta kuvaava luku, joka ottaa huomioon myös tietokonesalista ulos syötettävän energian, kuten hukkalämmön hyödyntämisen. NPUE:n käänteisluku.
EOC	<i>Environmentally opportunistic computing</i> , malli, jossa tietokonesalit ajatellaan joukoksi hajautettuja lämmöntuotantolaitoksia.
ERE	<i>Energy Reuse Effectiveness</i> , tietokonesalien energiatehokkuutta kuvaava luku, joka ottaa huomioon myös hukkalämmön hyödyntämisen.



ERF	<i>Energy Reuse Factor</i> , hyödynnetyn hukkalämmön osuutta koko tietokonesalin energiankulutuksesta kuvaava suure.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , eurooppalainen telealan standardisoimisjärjestö.
IT	<i>Information technology</i> , tietotekniikka
ITC	<i>Information and communications technology</i> , tieto- ja viestintäteknologia
LVI	Lämpö, vesi ja ilmanvaihto
LVIA	Lämpö, vesi, ilmanvaihto ja automaatio
LVIJ	Lämpö, vesi, ilmanvaihto ja jäähdytys
LTO	Lämmöntalteenotto
ORC	<i>Organic Rankine Cycle</i> , prosessi, jossa kiertoaineena on käyttökohteeseen sopiva orgaaninen fluidi
NPUE	<i>Net Power Usage Effectiveness</i> , tietokonesalien energiatehokkuutta kuvaava luku, joka ottaa huomioon myös hukkalämmön hyödyntämisen.
pPUE	<i>Partial Power Usage Effectiveness</i> , tietokonesalien energiatehokkuutta kuvaava luku, jota voidaan käyttää, jos järjestelmästä saadaan rajattu osa-alue.
PUE	<i>Power Usage Effectiveness</i> , tietokonesalien energiatehokkuutta kuvaava luku: tietokonesalin kokonaisenergian kulutus verrattuna tietotekniikkalaitteiston kulutukseen.
VIK	Vakioilmastointikone, tässä työssä käytetään myös lyhennettä CRAH
VSF	<i>Variable Speed Fan</i> , muuttuvanopeuksinen tuuletin

# 1 Johdanto

## 1.1 Diplomityön taustaa

Informaatio- ja kommunikaatio-teknologian sovellusten ja palveluiden sekä verkkoliikenteen määrä kasvavat jatkuvasti. Entistä paremmat, nopeammat ja laajemmalle levittyvät tietoliikenneyhteydet mahdollistavat dataliikenteen valtavan kasvun. Digitaalisen vallankumouksen ja pilvipalvelujen yleistymisen myötä liikkuvan ja prosessoitavan datan lisääntyessä myös tietokonesalien tarve lisääntyy.

Tietokonesali on tietotekniikkalaitteille, kuten palvelimille, tallennusjärjestelmille ja tietoliikennelaitteille sekä näiden niiden vara- ja suojausjärjestelmille tarkoitettu ja niitä varten varusteltu tekninen laitetila. Pieniä tietokonesaleja kutsutaan myös palvelinhuoneiksi ja suuria datakeskuksiksi tai palvelinkeskuksiksi.

Tietokonesalien sähkönkulutus kaksinkertaistui Suomessa vuosina 2005-2010 ja tietokonesalien määrä, koko ja energiankulutus jatkavat nopeaa kasvuaan. Arvioiden mukaan tietokonesalit kuluttivat noin 1,3 % koko maailman sähkönkulutuksesta vuonna 2010 [1, s. 9]. Suomessa vastaavan luvun on arvioitu olevan 0,5-1,5 % ja Yhdysvalloissa noin 2 % [2, s. 4; 1, s. 9]. Tietokonesalien maailmanlaajuinen sähkönkulutus kasvoi vuosien 2011 ja 2012 välillä 19 % ja vuosien 2012 ja 2013 välillä 7 % [3, s 16-17].

Kaikki tietokonesalien tietoliikennelaitteiden kuluttamasta sähköstä muuttuu lämmöksi energian säilymislain mukaisesti [4, s. 3360], joten tietokonesalien lämpökuormat ovat erittäin suuria. Suurten lämpökuormien johdosta tietokonesalit tarvitsevat tehokasta jäähdytystä ja niissä on mahdollisuuksia laajamittaiseen hukkalämmön hyödyntämiseen.

## 1.2 Diplomityön tutkimuskysymykset

Tässä diplomityössä tutkitaan tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia eri menetelmillä sekä tietokonesalien

elinkaarikustannusten pienentämistä ja energiatehokkuuden parantamista hukkalämmön hyödyntämisen avulla. Diplomityön yhteydessä tehtyjen laskennallisten tarkastelujen ja optimoinnin avulla pyritään löytämään vastaukset seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

- 1. Mitä erilaisia hukkalämmön hyödyntekniikoita on olemassa ja kuinka ne soveltuvat tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämiseen?*
- 2. Mitkä ovat mahdollisuudet myydä tai hyödyntää tietokonesalin hukkalämpöä tietokonesalin kiinteistön ulkopuolella?*
- 3. Millä tietokonesalin jäähdytysjärjestelmän arvoilla (kylmäkäytävän lämpötila, kuumakäytävän lämpötila, jäähdytyksen menoveden lämpötila sekä jäähdytyksen meno- ja paluuveden lämpötilaero) saavutetaan teknis-taloudellisesti paras jäähdytysjärjestelmä hukkalämmön talteenoton kanssa?*
- 4. Mitkä ovat hukkalämmön hyödyntämisen vaikutukset tietokonesalin energiatehokkuuden mittareihin?*
- 5. Mitkä ovat hukkalämmön hyödyntämisen vaikutukset tietokonesalin elinkaarikustannuksiin?*

### **1.3 Diplomityön tavoitteet ja rajaus**

Tässä diplomityössä on tavoitteena löytää vastaukset edellä mainittuihin tutkimuskysymyksiin. Lisäksi tavoitteena on työn tuloksien ja johtopäätöksien hyödyntäminen työn tilaajan liiketoiminnan kehittämisessä ja edistämisessä sekä saatujen tuloksien hyödyntäminen todellisissa kohteissa.

Tässä työssä keskitytään ensisijaisesti tietokonesalien jäähdytysjärjestelmien energiatehokkuuteen ja elinkaarikustannuksiin. Muut energiatehokkuuteen ja elinkaarikustannuksiin vaikuttavat tekijät, kuten palvelinkanta, virranjakelu, muuntajahäviöt, UPS-järjestelmä ja valaistus on rajattu pääosin tämän diplomityön optimointiosuuden ulkopuolelle. Kyseiset järjestelmät huomioidaan kuitenkin energiatehokkuuslaskuissa sekä käydään läpi diplomityön kirjallisuusosassa. Tässä työssä ei myöskään käsitellä palvelinkeskusten ulkoisia rakenteita, turvallisuutta, automaattioratkaisuja, vaiheistuksia tai sijoittamista.

Tässä diplomityössä tutustutaan aiheen teorioihin sekä aihetta käsitteleviin tutkimuksiin ja tehdään kirjallisuuskatsaus aiheesta. Lisäksi tutkitaan valittujen menetelmien soveltuvuutta esimerkkikohteeseen simuloinnin ja teknis-taloudellisen optimoinnin avulla.

Kirjallisuustutkimus tehdään tieteellisten artikkeleiden, aihetta käsittelevien kirjojen, raporttien, opinnäytetöiden sekä muun aineiston perusteella. Kirjallisuuskatsauksessa esitellään tietokonesalien toimintaa ja tekniikkaa sekä tietokonesalien jäähdytysratkaisuja ja energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ja energiatehokkuuden mittareita. Lisäksi esitellään erilaisia tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia sekä niiden soveltuvuutta eri jäähdytysratkaisuille.

#### **1.4 Kirjallisuuskatsauksen lähdemateriaali**

Tietokonesalien määrän ja koon kasvaessa myös niitä käsittelevän kirjallisuuden määrä on lisääntynyt. Tietokonesaleja ja niiden jäähdytystä, energiatehokkuutta ja hukkalämmön hyödyntämistä käsitteleviä tieteellisiä artikkeleita, kirjoja, raportteja, ohjeita, konferenssiesityksiä, opinnäytetöitä ja lehtiartikkeleita on julkaistu laajalti viime vuosina. Myös laitevalmistajat ja konesalitoimijat ovat julkaisseet uusia tekniikoita ja energiatehokkaita konesaleja esitteleviä esitteitä tai tiedotteita.

Tietokonesalien energiatehokkuuden hallintaa ja tehostamista käsittelevää kirjallisuutta on melko runsaasti saatavilla [2] [4] [5] [8] [14] [18] [46] [51]. Energiatehokkuuden periaatteet ja energiatehokkuuden tehostamista edistävät toimet ovat lähdemateriaalissa laajasti yhtenäisiä.

Hukkalämmön hyödyntämistä käsittelevää lähdemateriaalia on saatavilla vähemmän ja useissa lähteissä vain mainitaan, että hukkalämmön hyödyntäminen kannattaa. Hukkalämmön hyödyntämisen kohde ja kannattavuus riippuu monista tekijöistä, kuten konesalin koosta, jäähdytysjärjestelmästä ja sijainnista, minkä johdosta siitä ei ole juurikaan julkaistuna yhtenäistä laajaa kirjallisuutta. Lähteessä [5] suositellaan hukkalämmön hyödyntämistä lisätutkimusaiheeksi.

Hukkalämmön hyödyntämisestä on kuitenkin saatavilla tapauskohtaisia case-tutkimuksia sekä erilaisia vaihtoehtoja esittelevää materiaalia. Hukkalämmön hyödyntämisestä on lisäksi julkaistu tiedotteita ja uutisia, joilla on myös markkinointitarkoitus. [19] [20] [21] [32] [33] [36] [39]

Eri hukkalämmön hyödyntämisen tekniikoita käsittelevää materiaalia on runsaasti saatavilla, mutta suuri osa materiaalista keskittyy teollisuuden hukkalämmön hyödyntämiseen, jossa hukkalämmön lämpötilat voivat olla huomattavasti tietokonesaleja korkeammat, jopa yli 400 °C. [24] [25] [28] [31] [35] [42] [43]

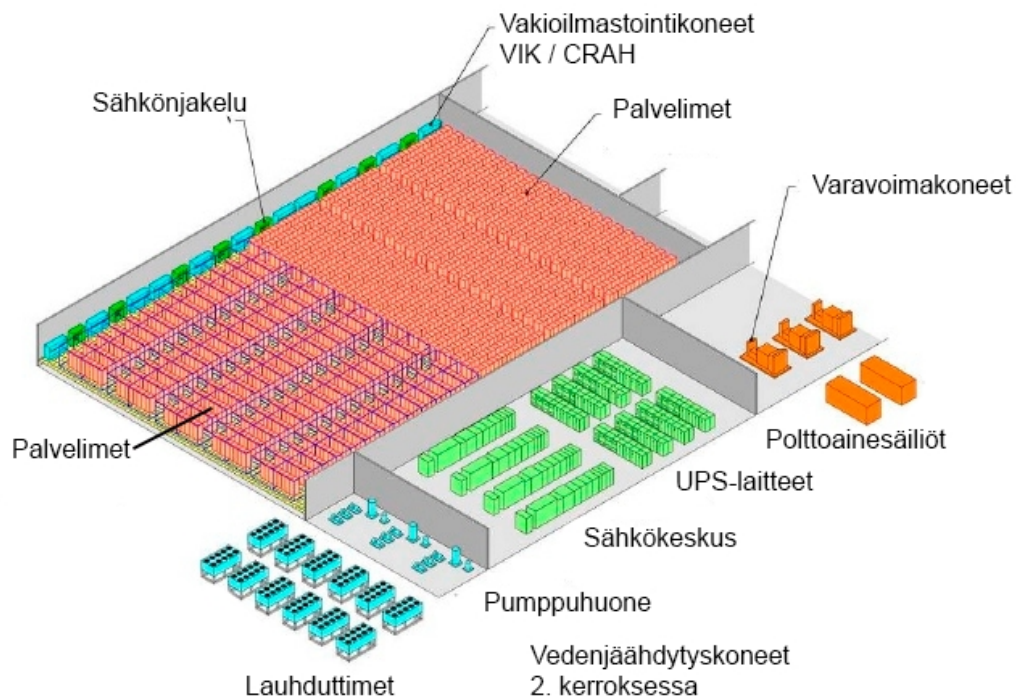
Tietokonesalien energiatehokkuuden mittareita käsittelevää lähdemateriaalia on hyvin saatavilla ja käytettävät mittarit on määritelty lähdemateriaalissa selkeästi. [2] [47] [48] [50] [51]

## 2 Tietokonesalit

Tietokonesalilla tarkoitetaan rakennusta tai rakennuksen osaa, joka muodostuu varsinaisesta laitetilasta, talotekniikan teknisistä tiloista sekä muista tietokonesalin toimintaa tukevista tiloista. Laitetilassa sijaitsee suuri määrä erilaisia tietotekniikkalaitteistoja, joita kutsutaan yleisesti palvelimiksi. Tietokonesalissa palvelimet on sijoitettu palvelintelineisiin, joita kutsutaan myös palvelinkaapeiksi tai räkeiksi. Palvelinteline on usean palvelimen sijoittamiseen tarkoitettu laiteteline, joka on mitoiltaan tyypillisesti mitoiltaan (syvyys\*leveys\*korkeus) 1200 mm\*600 mm\*2000 mm. [5, s. 10-11] Yhden palvelintelineen nimellinen sähköteho voi olla 2-30 kW riippuen palvelimen tyypistä. Pienemmät konesalit voivat olla sähköteholtaan kymmenien kilowattien kokoisia ja suurimmat jopa yli 50 MW. [6, s. 3-4]

Kasvavan digitaalisen tiedon ja dataliikenteen määrän ansiosta palvelinkapasiteettia tarvitaan jatkuvasti enemmän ja pienet palvelinhuoneet käyvät usein riittämättömiksi. Yritysten ulkoistaessa ja siirtäessä tallennus- ja laskentakapasiteettia pilveen muualla sijaitseville palvelimille suurten tietokonesalien tarve lisääntyy. Konesaliliiketoiminnasta onkin muodostunut kansainvälisesti merkittävä teollisuudenala. Konesaliliiketoiminnan arvoksi Suomessa arvioitiin vuonna 2010 noin eli 3 miljardia euroa ja alan arvo on kasvanut siitä merkittävästi. [2, s. 4]

Tietokonesalien tehtävä on tarjota palvelimille keskitetty, luetettava, varmennettu ja vakaa toimintaympäristö. Tietokonesalin palvelimien luotettavan toiminnan ja datan saatavuuden varmistamiseksi tietokonesali varustetaan jäähdytys-, virranjakelu-, UPS-, palontorjunta-, valvonta- ja varavoimajärjestelmillä. [5, s.10]. kuvassa 1 on kuvattu tyypillisen konesalin tilaohjelma, jossa on esitetty palvelimien laitetilan lisäksi konesalin toimintaa tukevat tekniset laitetilat. Tämän lisäksi konesalirakennuksessa sijaitsee tavallisesti valvomo sekä sosiaali- ja asiakastiloja.



Kuva 1. Tyypillisen tietokonesalin tilaohjelma. Muokattu lähteestä [5, s. 10]

Tietokonesalien luetettavuuden takaamiseksi palvelimien ja jäähdytyksen toiminta varmennetaan usein kahdennetulla sähkön- ja jäähdytyksen jakelulla ja sekä kahdennetuilla virtalähteillä. Usein myös jäähdytysjärjestelmän sähkönsyöttö kahdennetaan ja lisäksi sähkön- sekä jäähdytyksen kapasiteetti suunnitellaan tarvetta suuremmaksi, jotta esimerkiksi yhden vedenjäähdytyskoneen tai vakioilmastointikoneen hajoaminen ei vaikuta jäähdytyskapasiteettiin. Tietokonesalien redundanttisuutta eli varmennusastetta kuvataan termeillä N (need), N+1, N+2, 2N, 2N+1 ja niin edelleen. N kirjaimen jälkeinen numero kuvaa järjestelmän vaihtoehtoisten komponenttien ja jakeluteiden määrää. N-kirjaimen edessä oleva numero kuvaa järjestelmän aktiivisten komponenttien ja jakeluteiden määrää. 2N tarkoittaa siis esimerkiksi, että jäähdytys tuodaan vakioilmastointikoneille kahta eri jakelureittiä pitkin samanaikaisesti.[5, s.11-13]

Tietokonesalin varmennusastetta kuvataan usein myös Tier-luokittelun mukaisilla luokilla Tier I - Tier IV, joissa suurempi Tier-luokka tarkoittaa parempaa varmennusta. Parempi varmennusaste lisää kuitenkin järjestelmien kustannuksia sekä lisää järjestelmien tilantarvetta. Useimmat rakennettavat uudet suuret

konesalit suunnitellaan täyttämään Tier II tai Tier III -luokan varmennustason. [5, s. 11-13][7] Tier luokkien oleelliset vaatimukset on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 1). Tier-luokitus on esitelty tarkemmin lähteessä [7]

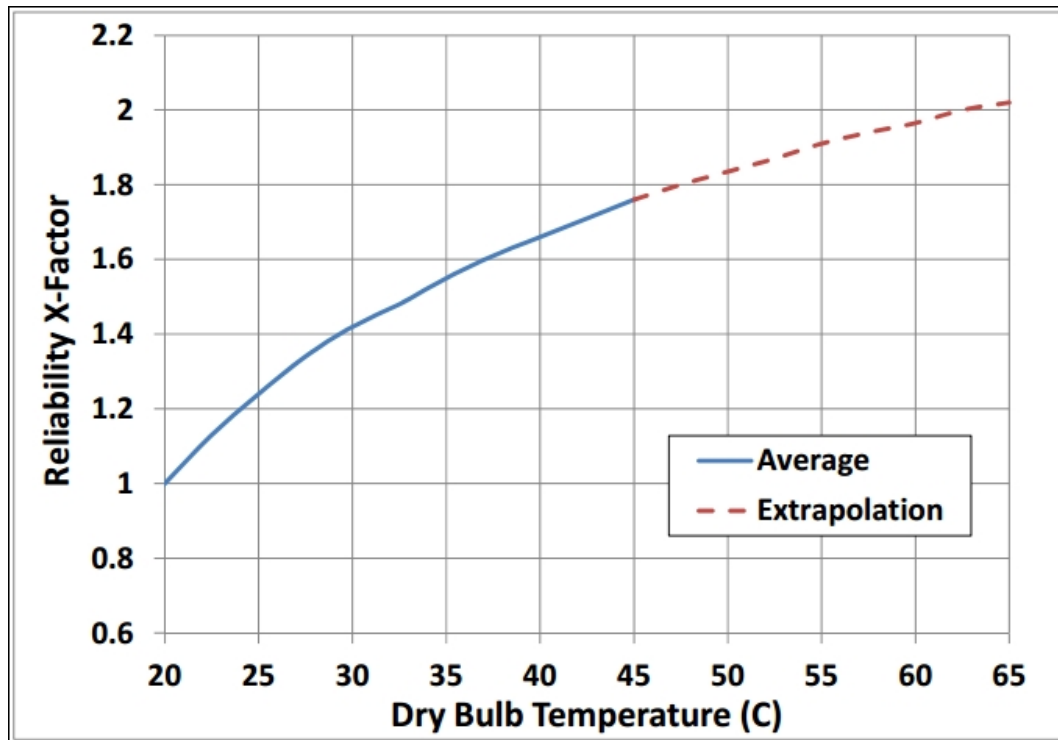
**Taulukko 1. Tier -luokkien vaatimukset [7, s.4]**

	Tier I	Tier II	Tier III	Tier IV
Active Capacity Components to Support IT Load	N	N+1	N+1	N, after any failure
Distribution Paths	1	1	1 active 1 alternate	2 simultaneously active
Concurrently Maintainable	No	No	Yes	Yes
Fault Tolerance (Single Event)	No	No	No	Yes
Compartmentalization	No	No	No	Yes
Continuous Cooling	load density dependent	load density dependent	load density dependent	Yes

## 2.1 Tietokonesalien jäähdytystarve ja ohjearvot

Tietokonesalit tarvitsevat jäähdytystä voidakseen toimia luotettavasti, sillä tietoteknisten laitteiden vikaantuvuus kasvaa komponenttien lämpötilan kasvaessa. Alla olevassa kuvaajassa (Kuva 2) on esitetty IT-laitteiden vikaantuvuus verrattuna vikaantuvuuteen referenssilämpötilassa 20 °C. Kuvaaja on muodostettu tiedosta, joka on saatu suuresta määrästä erilaisia tietoteknisiä laitteita todellisissa kohteissa. [8, s. 26-27] [10, s. 38]





Kuva 2. Tietoteknisten laitteiden vikaantuvuus suhteessa laittilan lämpötilaan. [8, s. 27]

Myös palvelimien laitevalmistajien takuuehdot ovat perinteisesti vaatineet alhaista sisäilman lämpötilaa palvelintilassa. Palvelimien elinkaari on kuitenkin käytännössä niin lyhyt (3-8 vuotta), ettei käyttölämpötilan nostaminen lähelle ASHRAEn suosituksen mukaista maksimilämpötilaa (27 °C)(Taulukko 2) vaikuta palvelimien käyttöikänsä.[9, s. 14-15] [2, s. 6]

Suurin osa tietokonesalien sisäilman suositusarvoista ja suunnittelun ohjearvoista ovat ASHRAEn (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) suositusten mukaisia. Vuonna 2004 julkaistuissa suunnitteluohjeissa suositeltiin palvelimien ilman lämpötilaksi 20-25 °C lämpötiloja. Suunnitteluohjeista julkaistiin toinen painos 2008, jossa suositeltiin palvelimille menevän ilman lämpötilaksi 18-27 °C. [5, s. 23-24]

ASHRAEn ohjearvot tietokonesalien lämpötilalle ja kosteudelle on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 2) ja kuvassa (Kuva 3). ASHRAEn ohjeen mukaan tietokonesali voi toimia hieman ohjearvojen ulkopuolella lyhyitä aikoja, ilman että sillä on vaikutusta tietotekniikkalaitteiden luotettavuuteen. Tietokonesalien

luotettavuuden takaamiseksi niiden tulisi kuitenkin toimia mahdollisimman tarkasti ohjearvojen puitteissa. [10, s. 7-9]

ASHRAEn ohjeessa tietokonesalit on luokiteltu neljään luokkaan niiden varustetason ja sisäilmasto-olosuhteiden mukaisesti. Luokkaan A1 kuuluvat tiukasti kontrolloidut tietokonesalit, jossa määriteltä kastepiste, suhteellinen kosteus ja lämpötilarajat. Luokat A2, A3 ja A4 ovat jonkin verran kontrolloituja tietokonesaleja, joissa sisäilmasto-olosuhteet ovat väljemmät. [10, s. 7]

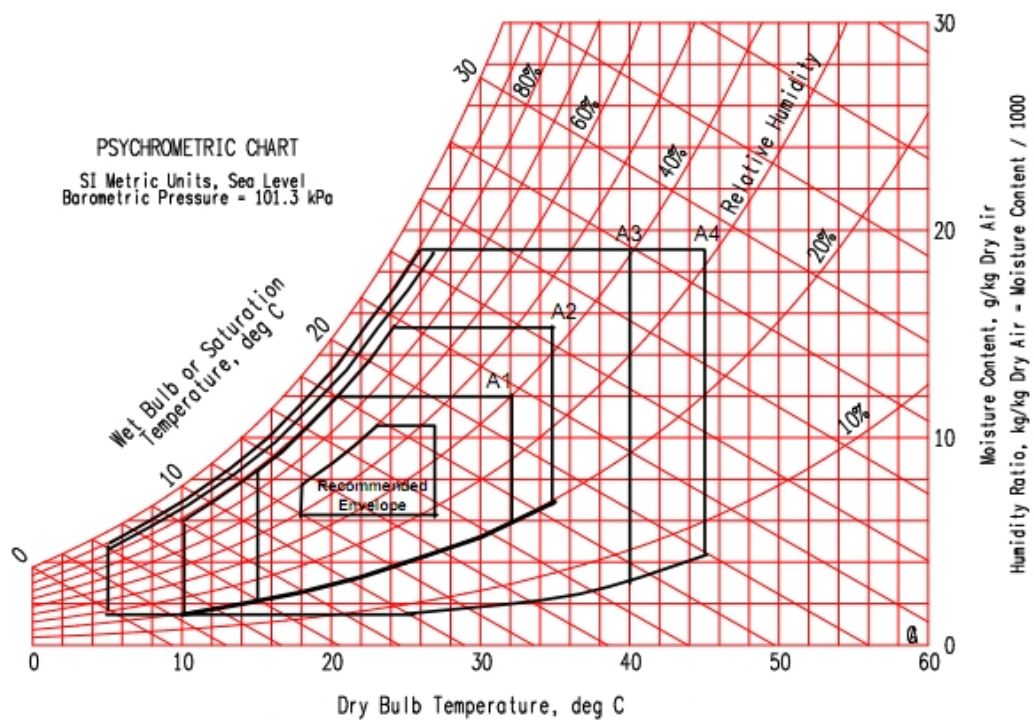


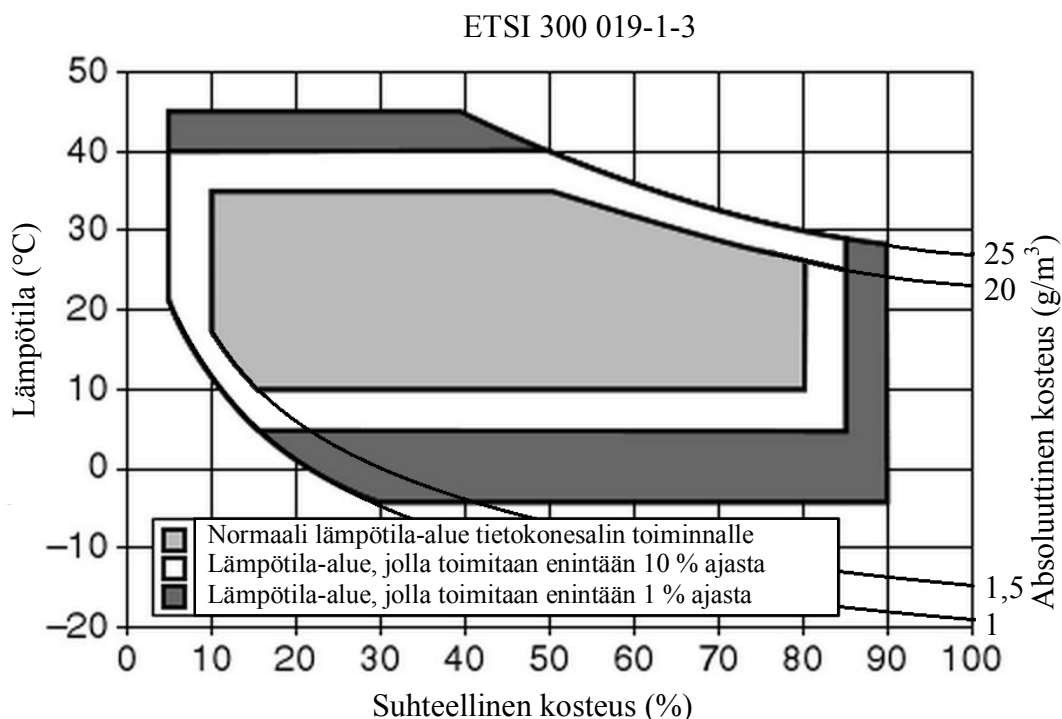
Figure 2. ASHRAE Environmental Classes for Data Centers

Kuva 3. ASHRAEn ohjearvot tietokonesalien lämpötilalle ja kosteudelle

Taulukko 2. ASHRAEn ohjearvot tietokonesalien lämpötilalle ja kosteudelle

	Suosittelut	Sallittu			
	A1, A2, A3 & A4	A1	A2	A3	A4
Lämpötilan alaraja	18 °C	15 °C	10 °C	5 °C	5 °C
Lämpötilan yläraja	27 °C	32 °C	35 °C	40 °C	45 °C
Kosteuden alaraja	5,5 °C DP	20 % RH	20 % RH	8 % RH	85 % RH
Kosteuden yläraja	60 % RH ja 15 °C DP	80 % RH	80 % RH	8 % RH ja -12 °C DP	90 % RH
Kastepisteen yläraja	15 °C	17 °C	21 °C	24 °C	24 °C

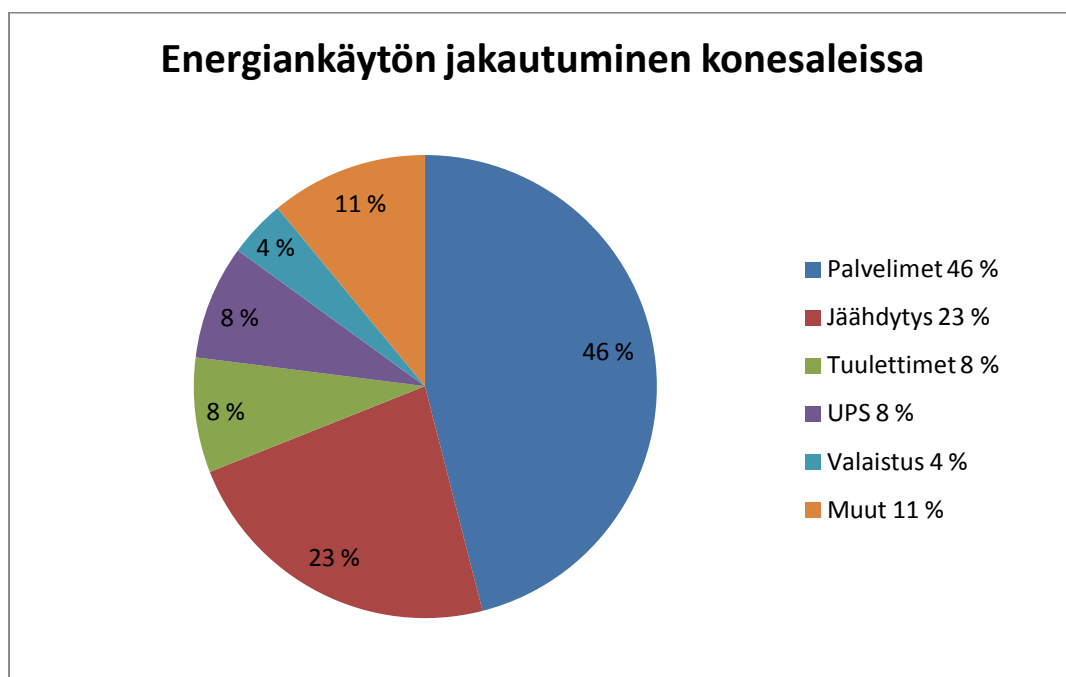
Myös eurooppalainen telealan standardoimisjärjestö *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) on määritellyt lämpötilan ja kosteuden ohjearvoja tietokonesalien sisäilmastolle standardissa ETSI 300 019-1-3 V 2.4.1. (Kuva 4). [11, s. 7-8]



Kuva 4. Standardin ETSI 300 019-1-3 mukaiset lämpötilan ja kosteuden ohjearvot tietokonesaleille

Konesaleja on jäähdytettävä ympäri vuoden. Jäähdytysjärjestelmä kuluttaa tyypillisesti noin 15-30 prosenttia tietokonesalin käyttämästä sähköstä (Kuva 5), mutta Suomessa jäähdytyksen energiankulutus voi olla merkittävästi pienempi

pitkän vapaajäähdytyskauden ansiosta. Edistyksellisissä tietokonesaleissa jäähdytyksen osuus energiankulutuksesta on alle 10 prosenttia, joten jäähdytyksestä löytyy usein suuri energiansäästöpotentiaali. Jatkuvan jäähdytystarpeen johdosta tietokonesalien jäähdytysjärjestelmän huolellinen suunnittelu ja optimointi kannattavat [2, s. 5]. Tietokonesalit voivat kuluttaa jopa 200-kertaisesti sähköenergiaa pinta-alaa kohden verrattuna tavanomaiseen toimistorakennukseen [12, s. 357].



**Kuva 5. Energiankäytön jakautuminen tyypillisissä tietokonesaleissa, joiden energiatehokkuudessa olisi reilusti parannettavaa [2].**

Jäähdytysjärjestelmän energiankulutus muodostuu tyypillisesti pääosin jäähdytys- ja lauhdepiirin pumpuista, vakioilmastointikoneiden tai rivijäähdyttimien puhaltimista, lauhduttimien puhaltimista sekä vedenjäähdytyskoneiden kompressoreista. Myös palvelimien tuulettimet kuluttavat huomattavan osuuden tietokonesalin sähköenergiasta.

Jäähdytysjärjestelmän lisäksi myös UPS-järjestelmät ovat merkittävä energiankulutuksen kohde tietokonesaleissa. UPS-järjestelmällä ja kahdennetulla virranjakelulla taataan konesalin toimintavarmuus ja virransaanti häiriötilanteissa. UPS-laitteistot kuluttavat kuitenkin merkittävästi sähköenergiaa, sillä ne toimivat jatkuvasti osateholla. Sähkönjakelun ja UPS -laitteiden häviöitä voidaan kuitenkin

vähentää merkittävästi suunnittelemalla järjestelmät modulaarisiksi sekä käyttämällä korkean hyötysuhteen UPS-laitteita. [5, s. 34]

## **2.2 Jäähdytyksen tuotantotavat**

### **2.2.1 Koneellinen jäähdytys ja vapaajäähdytys**

Konesalien jäähdytysjärjestelmän perustana voidaan käyttää koneellista jäähdytystä, vapaajäähdytystä tai näiden yhdistelmää. Yleisimmin käytetään kompressorilla toimivan jäähdytyslaitteen ja vapaajäähdytysjärjestelmän yhdistelmää, jossa vapaajäähdytystä pyritään käyttämään mahdollisimman paljon. [14, s. 9-10; 2, s. 8]

Kompressorikäyttöisissä vedenjäähdytyskoneissa jäähdytysenergia tuotetaan kompressorien avulla. Kompressorit voi olla tyypiltään mäntäkompressorit, ruuvikompressorit, scroll-kompressorit tai turbokompressorit. Tyypillisesti ruuvikompressorit ja turbokompressorit ovat teholuokiltaan suurempia kuin mäntäkompressorit tai scroll-kompressorit. Vedenjäähdytyskoneella tuotettu jäähdytysteho siirretään jäähdytettävään kohteeseen jäähdyttämällä vettä, jolla voidaan jäähdyttää vakioilmastointikoneen tuloilmaa tai joka voidaan johtaa tilassa olevaan jäähdytyslaitteeseen. Vedenjäähdytyskone käyttää jäähdytysenergian tuottamiseen sähköä, josta suurin osa kohdistuu kompressoreille. Vedenjäähdytyskoneessa on kompressoriyksikön lisäksi usein nestepiireissä kiertovesipumppuja sekä puhaltimia, jotka tehostavat lauhdutusosan ilman kiertoa. Vedenjäähdytyskoneen kylmäkertoimeen vaikuttavat enimmäkseen höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat, laitteiston tyyppi sekä käytetty kylmäaine. [13, s. 10-12]

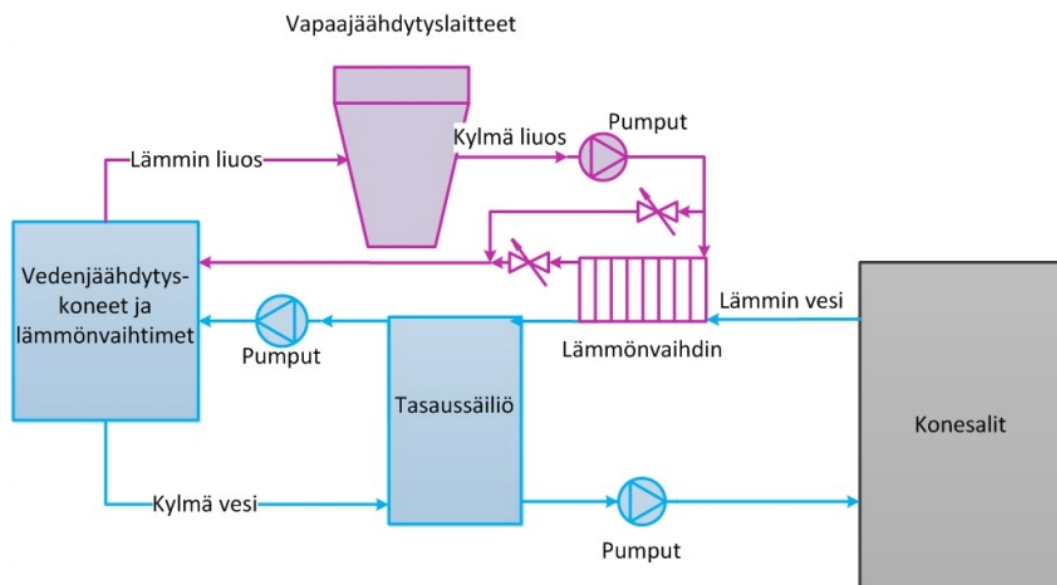
Vapaajäähdytyksessä sähköä kuluu pääasiassa vain jäähdytysveden kierrättämiseen ja nestejäähdyttimen puhaltimiin. Koneellista jäähdytystä pyritään käyttämään mahdollisimman vähän, koska jäähdytyskapasiteetin tuottaminen koneellisesti kuluttaa paljon energiaa verrattuna vapaajäähdytykseen. Vapaajäähdytyksessä viileän vesistön, maaperän tai ulkoilman jäähdytyskapasiteettia siirretään kiinteistön sisälle useimmiten jäähdytysveden tai

-nesteiden välityksellä. Koneellista jäähdytystä käytetään silloin, kun vapaajäähdytys ei ole mahdollista, eli usein vain kesäaikaan. Vesistöistä saatavaa vapaajäähdytystä voidaan Suomen olosuhteissa käyttää ympäri vuoden. Mikäli vesistön lämpötila ei ole riittävän matala, voidaan jäähdytystä tehostaa kompressoriteknikkaan perustuvalla lämpöpumpulla. Suomi on otollinen paikka vapaajäähdytykselle kylmän ilmaston ja runsaiden vesistöjen ansiosta. [14, s. 9-10; 2, s. 8]

Jäähdytys voidaan toteuttaa myös suoravapaa jäähdytyksellä käyttämällä kylmää suodatettua ulkoilmaa tietokonesalin jäähdyttämiseen. Kylmää ulkoilmaa hyödynnettäessä vapaajäähdytystä käytetään, kun ulkoilman lämpötila on riittävän matala. [2, s. 8]

Monissa jäähdytysjärjestelmissä vapaajäähdytyksen asetusarvo 10 °C ja 15 °C välillä, eli vapaajäähdytystä hyödynnetään kun ulkolämpötila on alle sen. Asetusarvo kannatta asettaa mahdollisimman korkeaksi, jotta vapaajäähdytyksen osuus kasvaa ja jäähdytyksen energiatehokkuus paranee. Lämpötilapisteen nostaminen vaatii kuitenkin myös ilmamäärien ja jäähdytysveden virtaaman kasvattamista, joten jäähdytyslaitteiston sopivuus on tarkastettava tilannekohtaisesti. [14, s. 10; 2, s. 8]

Jäähdytystekniikasta riippumatta keskitetty, korkean hyötysuhteen ja käytettävyyden jäähdytysjärjestelmä on usein edellytys tietokonesalien energiatehokkaan jäähdytykselle. Keskitetyn järjestelmän energiatehokkuus ja suorituskyky on parempi kuin usean pienen jäähdytysjärjestelmän. Lisäksi keskitetyn jäähdytysjärjestelmän toimintavarmuus on hajautettua ratkaisua parempi, ja sitä voidaan ohjata paremmin akuutin jäähdytystarpeen mukaan. [14, s. 9] Tietokonesalien hajautettu sijoitus voi kuitenkin luoda uudenlaisen mahdollisuuden hukkalämmön hyödyntämiselle. Tästä kerrotaan lisää kappaleessa *3.3.3 Hajautettu lämmöntuotanto tietokonesalien avulla.*



Kuva 6. Vapaajäähdystystä hyödyntävän järjestelmän periaatekaavio.

### 2.2.2 Kaukojäähdytys

Kaukolämmön tavoin toimiva kaukojäähdytys on jäähdytysmuoto, joka yleistyy Suomen suurissa kaupungeissa [15; 2, s. 9]. Jäähdytysenergia tuotetaan energiayhtiön toimesta keskitetysti ja siirretään laajaa verkostoa pitkin jäähdytystä tarvitseville rakennuksille jäähdytetyn veden avulla. Jäähdytysvesi johdetaan jäähdytyslaitokselta jäähdytettävän rakennuksen lämmönsiirtimelle, jossa se jäähdyttää kiinteistön jäähdytysvettä. Lämmönsiirtimen jälkeen lämmennyt vesi johdetaan verkoston paluuputkea pitkin takaisin energiayhtiölle. Energiayhtiön jäähdytyslaitoksessa sama vesi jäähdytetään uudelleen ja toimitetaan asiakkaille. [16, s. 7]

Kaukojäähdytysverkoston jäähdytysveden lämpötila vaihtelee jäähdytysenergian tuottotavan mukaan eri kaukojäähdytysjärjestelmissä. Absorptiotekniikalla tai vapaajäähdetyksellä jäähdytysenergiaa tuottaessa jäähdytysveden menopuolen lämpötila on yleensä 8 °C. Kompressorijäähdytyskoneilla jäähdytetyn jäähdytysveden menopuolen lämpötila voidaan laskea 6 °C:een. Kaukojäähdytysverkoston ensiöpuolen meno- ja paluupuolen mitoitustemperatuurina käytetään vähintään 8 °C. [16, s. 7-8]

Kaukojäähdytyksessä tietokonesalikiinteistön jäähdytyslaitteiston vaatiman teknisen tilan tilantarve on pienempi kuin kiinteistössä tuotettavalla jäähdytysenergialla eikä erillisiä lauhdutinyksiköitä tarvita, ellei varajäähdytystä toteuteta lauhduttimien avulla. [16, s. 1]. Kaukojäähdytys on myös melko huoltovapaa jäähdytysmuoto, koska liikkuvia ja kunnossapidettäviä osia on vain vähän [17, s. 3]. Mikäli kaukojäähdytyksen rinnalle kuitenkin rakennetaan erillinen jäähdytyslaitteisto vikasietoisuussyistä, vaatii se lisää teknistä tilaa [2, s. 6].

## **2.3 Konesalin jäähdytys**

### **2.3.1 Ilmajäähdytys**

Ilmajäähdytys toteutetaan yleensä vakioilmastointikoneiden (VIK) ja korotetun lattian avulla [4, s. 3361]. Tietokonesalien vakioilmastointikoneita kutsutaan usein myös englanninkielisillä lyhenteillä CRAC (Computer Room Air Conditioner) ja CRAH (Computer Room Air Handler). Tietokonesaleissa voidaan käyttää suorahöyrysteistä tai jäähdytetyllä vedellä toimivaa vakioilmastointikonetta. Suorahöyrysteinen vakioilmastointikone sisältää puhaltimen lisäksi mm. kompressorin, höyrystinpatterin, ja paisuntaventtiilin. Suurissa tietokonesaleissa käytetään tyypillisesti vain jäähdytyspatterin, puhaltimen ja suodattimen sisältävää jäähdytetyllä vedellä toimivaa vakioilmastointikonetta, joka pitää tietokonesalin sisäilmasto-olosuhteet määrätyissä rajoissa. [5, s. 20]

Ilmajäähdytys voidaan toteuttaa myös rivijäähdyttimillä, jotka sisältävät nestekiertoisen jäähdytyspatterin ja puhaltimet. Rivijäähdyttimet sijoitetaan palvelinrakkiriviin palvelinrakkien väliin, jossa ne imevät kuumaa ilmaa laitteiden takaa kuumakäytävältä, jäähdyttävät sen ja puhaltavat sen laitteiden eteen kylmäkäytävälle. Rivijäähdytys on CRAH-ratkaisua kalliimpi toteuttaa ja se vaatii enemmän putkiliitoksia jäähdytyslaitteiden suuremman lukumäärän takia, joten vuotojen ehkäisyyn ja riskienhallintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota. CRAHeillä toteutettu jäähdytys on myös muuntojoustavampi kuin rivijäähdytys.

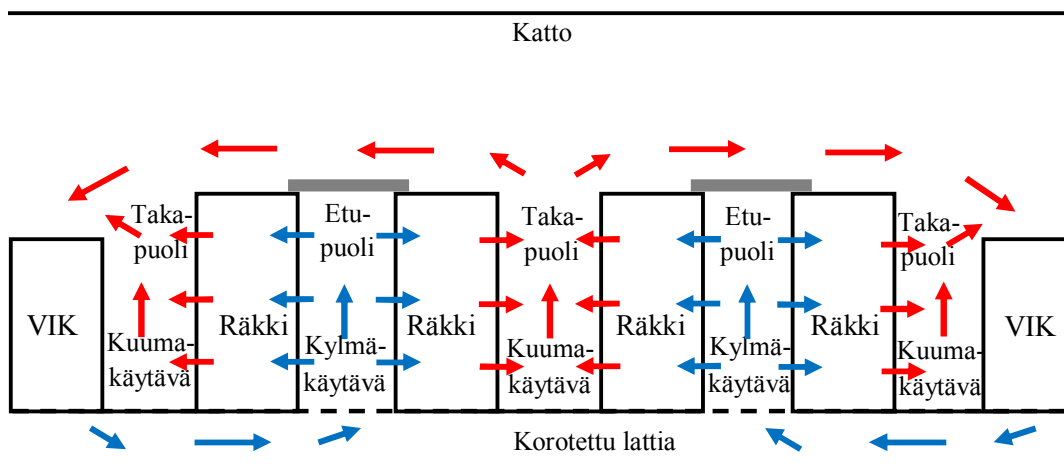


Ilmajäähdytyksessä tarkoituksena on tehokas kuuman ilman siirto pois lämpöä tuottavasta kohteesta sekä lämpölähteen jäähdytys. Kuuman ilman poisto heti sen synnyttyä mahdollistaa hyvän jäähdytyksen hyötysuhteen verrattuna tilanteeseen, jossa jäähdytettävä kuuma ilma pääsee sekoittumaan jäähdytysilmaan ennen sen jäähdytysvaikutusta lämpölähteeseen. Jäähdytysperiaatteena kylmän jäähdytysilman kohdistaminen mahdollisimman tehokkaasti lämpölähteeseen on energiatehokkaampi menetelmä kuin antaa huoneilman lämmitä ja jäähdyttää huoneilmaa, joka viiletessään jäähdyttää lämpöä tuottavia komponentteja. [14, s. 8]

Palvelinlaitteiden sijoittelulla on suuri merkitys ilmajäähdytyksen energiatehokkuuden kannalta. Yhtenäinen sijoittelu edesauttaa jäähdytyksen kohdentamista lämpölähteisiin ja lämpimän ilman tehokasta poistoa. [14, s. 8]

Perusperiaatteena palvelinten sijoittelussa on, että laitekaapit asennetaan riveihin ns. selät vastakkain. Täten tietokonesaliin muodostuu vuorotellen kylmiä ja kuumia käytäviä, jotka mahdollistavat tehokkaan jäähdytyksen ja tasaisen ilman kulun palvelinten ja jäähdytyslaitteiston välillä. Laitteiden tuottama kuuma ilma siirtyy laitekaappien takapuolelle kuumalle käytävälle, josta se poistetaan mahdollisimman tehokkaasti. Energiatehokkuuden kannalta on tärkeää estää kuumien ja kylmien käytävien ilmojen sekoittuminen. Ilmavirtojen sekoittumisen estämistä voidaan tehostaa fyysisillä esteillä, kuten paloturvallisella pleksillä tai vastaavalla, sekä sijoittamalla poistoilmalaitteet mahdollisimman lähelle laitekaappien yläreunaa kuumakäytävillä. [14, s. 8]

Kuva 7 on esitetty kylmä- ja kuumakäytävien toteutusperiaate vakioilmastointikoneiden, korotetun lattian ja fyysisten esteiden avulla toteutettuna.



Kuva 7. Kylmä- ja kuumakäytäväperiaate vakioilmastoitinkoneiden, korotetun lattian ja fyysisisten esteiden avulla

Myös laitetelineiden suunnittelulla, koteloinnilla ja selkeällä kaapeloinnilla parannetaan ilmanvirtausta laitteiden läheisyydessä, jolloin jäähdytys pystytään paremmin kohdentamaan lämpölähteeseen. Ilmajäähdytysjärjestelmän energiatehokkuus voi heikentyä jopa 50 %, jos tarkoituksenmukainen ilman kierto estyy. [2, s. 8]

Vakioilmastointikoneilla tai rivijäähdyttimillä toteutetussa jäähdytysverkossa verkoston meno- ja paluuveden lämpötilat ovat tyypillisesti kohteesta riippuen lämpötila-alueella 7-23 °C siten, että verkoston meno- ja paluuveden lämpötilaero on 5-10 °C. Aiemmin konesaleissa on käytetty jäähdytysverkoston lämpötilojen asetusarvoina menopuolelle 7 °C ja paluupuolelle 12 °C, mutta nykyään tietokonesalien jäähdytysverkostot suunnitellaan yleisemmin noin kymmenen astetta lämpimämmille lämpötilatasoille ja suuremmalle verkoston meno- ja paluupuolen lämpötilaerolle.

### 2.3.1.1 Ilman lämpötilat kuuma- ja kylmäkäytävillä

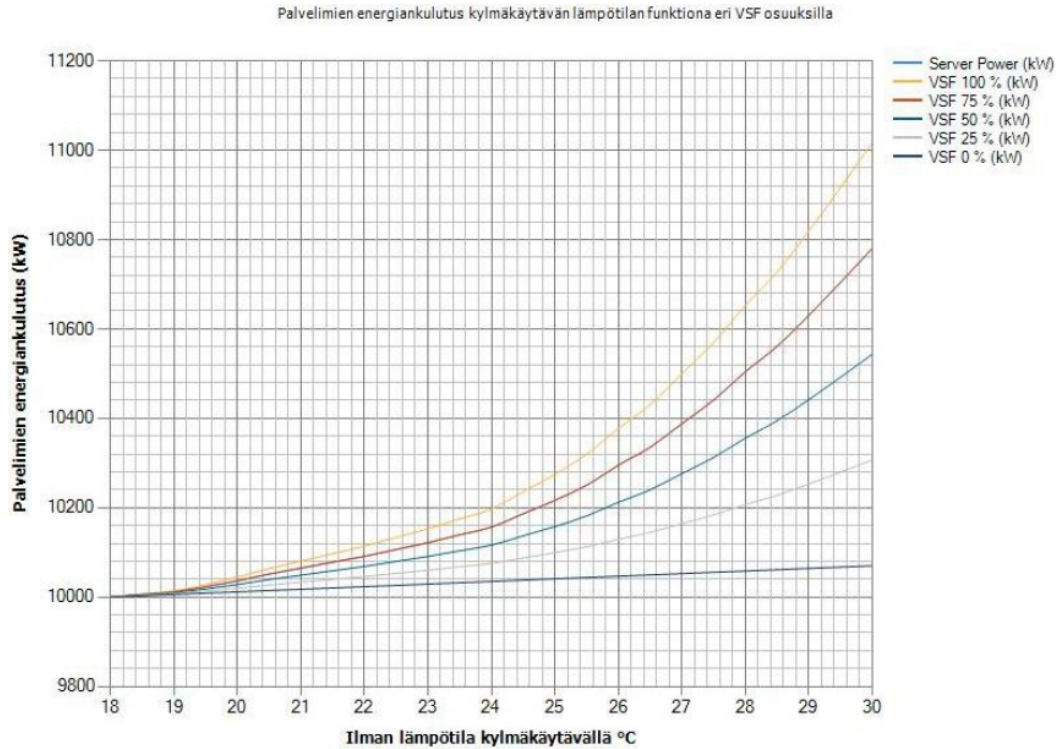
Tietokonesalien lämpötilaa on pyritty perinteisesti pitämään viileänä (18-20 °C tai alle), jotta tietotekniikkalaitteet toimisivat mahdollisimman hyvin. Käytännössä kylmäkäytävän lämpötila voidaan kuitenkin nostaa 27 °C, ilman vaikutusta nykyteknologian mukaisten palvelimien toimintaan, kuten kappaleessa 2.1 *Tietokonesalien jäähdytystarve ja ohjearvot* todetaan. Kylmäkäytävän

lämpötilassa on kuitenkin huomioitava palvelinrakkien aiheuttama lämpötilagradientti, joka on nykyaikaisilla palvelimilla noin 2-3 °C palvelinrakin ala- ja yläosan välillä, joten ylimmille palvelimille tulevan ilman lämpötila on lämpimämpi kuin lattian kautta kylmäkäytävälle ohjatun ilman. Kylmäkäytävän lämpötila pitää siis asettaa siten, etteivät lämpötilavaatimukset ylity ylimmällekään palvelimelle. [5, s. 20-25]

Korkeampi kylmäkäytävän lämpötila mahdollistaa korkeamman jäähdytysveden lämpötilan. Jäähdytysveden korkeampi lämpötila lisää vapaajäähdytyksen käyttöaikaa, mikäli vapaajäähdytystä hyödynnetään ja parantaa vedenjäähdytyskoneen kylmäkerrointa tai lämpöpumpun lämpökerrointa pienentämällä lämpötilatasojen välistä eroa (kaava (3.5)). [5, s. 24]

Kylmäkäytävän lämpötilan nostolla on kuitenkin myös negatiivisia vaikutuksia tietokonesalin operoinnille. Kylmäkäytävän korkeampi lämpötila lyhentää jäähdytyksen puskuriaikaa ongelmatilanteissa. Jäähdytysjärjestelmän sammuessaa tietokonesalin lämpötila nousee nopeasti ja 60-80 °C lämpötilassa palvelimien prosessorit ylikuumenevat ja sammuvat. Jäähdytyskapasiteetin menettämisestä kriittiseen lämpötilaan kuluu palvelimien energiatiheudesta riippuen 1-3 minuuttia, ellei varajärjestelmää ole. [5, s. 24-25]

Kylmäkäytävän lämpötilan nosto yli 18 °C lämpötilaan lisää palvelimien ja palvelimien imutuulettimien energiankäyttöä, mikäli tuulettimien pyörimisnopeus muuttuu lämpötilan mukaan. Tuulettimia, joiden pyörimisnopeuden säätö tapahtuu portaattomasti lämpötilan mukaan, kutsutaan VSF-tyypin tuulettimiksi (Variable Speed Fan). Mikäli palvelimien tuulettimet ovat vakionopeuksisia (CSF, Constant Speed Fan), ei lämpötilan nostolla ole lisäävää vaikutusta tuulettimien energiankäyttöön. Alla olevassa kuvassa on esitetty palvelimien ja tuulettimien yhteenlaskettu energiankulutus kylmäkäytävän lämpötilan funktiona 10 000 kW tietokonesalissa eri VSF-osuuksilla. Kylmäkäytävän lämpötilan nosto voi siis aiheuttaa jopa 10 % korotuksen palvelimien ja tuulettimien yhteenlaskettuun energiankulutukseen. [5, s. 26-27]



Kuva 8. 10 000 kW tietokonesalin palvelimien ja tuulettimien energiankulutus kylmäkäytävän lämpötilan funktiona eri VSF -osuuksilla.

Mikäli kuumakäytävän lämpötila pysyy vakiona, aiheuttaa kylmäkäytävän lämpötilan nosto myös CRAHin puhaltimen energiankulutuksen kasvua. Tämä johtuu CRAHin puhaltimen energiankulutuksen kasvusta, mikä aiheutuu affiniteettilaeista yhtälöiden 3.1 - 3.5 mukaisesti.

CRAHin ilmapuolen jäähdytysteho lasketaan kaavalla 3.1, kun oletetaan, että kondensoitumista ei tapahdu eli kokonaisjäähdytysteho on sama kuin tuntuva jäähdytysteho:

$$Q_{cool\_a} = \rho_a V_a c_{pa} \Delta t_a = \rho_a V_a c_{pa} (t_{ha} - t_{ca}) \quad (3.1)$$

jossa  $\rho_a$  on ilman tiheys,  $V_a$  ilman tilavuusvirta,  $c_{pa}$  ilman ominaislämpökapasiteetti,  $\Delta t_a$  kuuma- ja kylmäkäytävän lämpötilaero,  $t_{ha}$  kuumakäytävän lämpötila ja  $t_{ca}$  kylmäkäytävän lämpötila.

CRAHin jäähdytysteho, ilman tiheys sekä ilman ominaislämpökapasiteetti pysyvät likimain vakiona, joten

$$V_a(\Delta t_a) = V_a(t_{ha} - t_{ca}) \approx \text{vakio} \quad (3.2)$$

, mistä seuraa riippuvuus:

$$V_a \sim \frac{1}{t_{ha} - t_{ca}} \quad (3.3)$$

, siis kuumakäytävän lämpötilan pysyessä vakiona, kylmäkäytävän lämpötilan nosto lisää CRAHin tilavuusvirtaa.

CRAHin puhaltimelle pätevät seuraavat affiniteetilait, jos verkosto pysyy vakiona:

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{V_2} &= \frac{n_1}{n_2} \\ \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} &= \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \\ \frac{P_1}{P_2} &= \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3 \end{aligned} \quad (3.4)$$

, missä  $V_n$  on puhaltimen tilavuusvirta,  $n_n$  puhaltimen kierrosluku,  $\Delta p_n$  puhaltimen paineenkorotus ja  $P_n$  puhaltimen teho.

$$P_2 = P_1 \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^3 \approx P_1 \left( \frac{\Delta t_{a1}}{\Delta t_{a2}} \right)^3 \quad (3.5)$$

Siis esimerkiksi kuuma- ja kylmäkäytävän lämpötilaeron puolittuessa puhaltimen teho ja energiankulutus kahdeksankertaistuu affiniteetilakien perusteella:

$$P_2 \approx P_1 \left( \frac{\Delta t_{a1}}{0,5 \Delta t_{a1}} \right)^3 = P_1 * 2^3 = 8P_1$$

Kuuma- ja kylmäkäytävän lämpötilaeron ja CRAHin tilavuusvirran pieneneminen voi myös pienentää CRAHien kokoa ja täten alentaa niiden tilantarvetta [18, s. 8].

Affiniteetilakien mukaisesti kuumakäytävän korkeampi lämpötila vaikuttaa tietokonesalin jäähdytysjärjestelmän energiatehokkuuteen pienentämällä vakioilmastointikoneiden puhaltimien ilmavirtaa ja energiankulutusta. Kuumakäytävän lämpötilan nosto myös lisää lämmönsiirtoa vakioilmastointikoneen jäähdytyspatterilla sekä parantamalla vakioilmastointikoneen jäähdytystehoja. [5s. 22-23] Ilmajäähdytteisten tietokonesalien kuumakäytävän lämpötila on yleensä noin 35 °C suuruusluokkaa [19, s. 1-2].

### **2.3.2 Nestejäähdytys**

Nestejäähdytykseen on useita eri ratkaisumalleja. Nestejäähdytys voidaan toteuttaa palvelintelineen jäähdytysseinään tai suoraan komponenttien pinnalle niin sanotulla on-chip jäähdytysratkaisulla. Suoraan palvelintelineeseen asennettavaa nestejäähdytystä voidaan hyödyntää perinteisten tietokonesalien lisäksi myös lämpökapasiteetiltaan tiheämpiin kohteisiin kuten supertietokoneisiin. Jäähdytyksessä käytettävä neste on huomattavasti ilmaa tehokkaampi lämmönsiirtäjä ja sen jäähdytysteho voidaan kohdentaa tarkkaan halutulle alueelle. Nestejäähdytyksessä jäähdytysnesteen lämpötilat voivat olla korkeammat kuin ilmajäähdytteisissä järjestelmissä ja paluuveden lämpötila voi olla 30 asteen luokkaa.[14, s. 11]

Nestejäähdytyslaitteiston asentaminen suoraan palvelintelineeseen on melko uusi ja energiatehokas jäähdytysmenetelmä. Nestejäähdytyksessä periaatteena on siirtää palvelinlaitteiden tuottama lämpö jäähdytysnesteeseen mahdollisimman lähellä lämmön lähdettä, joten tiloja ei jäähdytetä turhaan, vaan jäähdytyksen vaikutus kohdistuu suoraan palvelimiin. Jäähdytysvesi tuodaan räkille, jossa se viilentää lämmönvaihtimessa räkin sisällä kiertävän jäähdytysnesteen. Lämpöä siirtävänä nesteinä käytetään yleensä vettä, mutta myös kylmäainetta voidaan käyttää. [2, s. 9]

Konesalissa voidaan käyttää myös samanaikaisesti sekä ilmajäähdytystä että vesijäähdytteisiä telineitä. Telinekohtaisen jäähdytyksen rakentaminen vanhoihin tietokonesaleihin voi kuitenkin olla hankalaa, mutta asia kannattaa selvittää kohdekohtaisesti, kun talotekniikan uusiminen on ajankohtaista.

Nestejäähdytysjärjestelmässä vesiliitoksia on huomattavasti enemmän kuin vakioilmastointikonein toteutetussa jäähdytyksessä, joten vesivuotojen ehkäisemiseen ja hallintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota [2, s. 9.]

### **2.3.3 Korkeamman lämpötilan nestejäähdytys**

Korkeamman lämpötilan nestejäähdytys, niin kutsuttu lämminvesijäähdytys tai kuumavesijäähdytys, on melko uusi jäähdytystapa, joka perustuu mikrokanavien avulla toteutettavaan suoraan lämmönpoistoon kohteesta. Jäähdytysmenetelmä on erityisesti kehitetty lämpökapasiteetiltaan tiheämpiin kohteisiin kuten supertietokoneisiin. Korkeamman lämpötilan nestejäähdytyksessä jäähdytysverkoston nesteen paluulämpötila voi olla 60-70 °C luokkaa, jolla tietotekniikkalaitteiden komponenttien lämpötila saadaan pidettyä alle 85 °C. Korkeamman nesteen paluulämpötilan ansiosta hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet ovat paremmat. [20, s. 237] Kuumavesijäähdytteisen konesalin hukkalämpöä voitaisiin esimerkiksi hyödyntää suoraan läheisten rakennusten lämmitykseen ilman lämpöpumppua. [20, s. 237][21]

Supertietokoneiden jäähdytykseen soveltuvaa kuumavesijäähdytystä ei kuitenkaan käytetä tyypillisissä konesaleissa sen kalliin hinnan ja tekniikan saatavuuden takia. Myös kuumavesijäähdytysjärjestelmässä vesiliitoksia on huomattavasti enemmän kuin vakioilmastointikonein toteutetussa jäähdytyksessä.

### **2.3.4 Kaksifaasijäähdytys**

Kaksifaasijäähdytys on uusi, supertietokoneiden jäähdytykseen tarkoitettu, vielä kehitteillä oleva jäähdytysmuoto, jolla voidaan jäähdyttää tietoliikennekomponentteja tehokkaammin kuin perinteisellä nestejäähdytyksellä [19, s. 1-2]. Kaksifaasijäähdytyksen tehokkuus perustuu järjestelmässä kiertävän, jäähdyttävän aineen kontrolloituun ja säädettävään kaksifaasisuuteen sekä lämmön poistoon suoraan jäähdytettävästä kohteesta. [22] Nestemäinen jäähdytysaine virtaa jäähdytettävän järjestelmän läpi mikrorakoihin keräten lämpöä jäähdytettävästä kohteesta. Jäähdytysaine saavuttaa kiehumispisteen mikroraoissa ja kaasuuntuu, jolloin faasimuutos sitoo jäähdytysnesteeseen olomuodon muutokseen tarvittavan latenttilämmön [23]. Kaksifaasijäähdytyksessä jäähdytysverkoston paluulämpötila voi olla noin 90 °C.

Korkeamman nesteen paluulämpötilan ansiosta hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet ovat paremmat. [19, s. 1-2]



## **3 Hukkalämmön hyödyntäminen**

### **3.1 Hukkalämmön määritelmä**

Hukkalämpö on lämpöenergiaa, joka poistuu systeemistä jäähdytysveden, poistoilman tai koneellisen jäähdytyksen lauhdelämmön mukana. Hukkalämpöä kutsutaan myös ylijäämä- tai jätelämmöksi. Ideaalitilanteessa tavoitteena on hyödyntää prosesseista ylijäävää lämpöä, niin että hukkalämmöstä mahdollisimman suuri osa saadaan hyödynnettyä. [24, s. 10] Tässä työssä hyödynnettävällä hukkalämmöllä tarkoitetaan lämpöä, joka olisi hukkalämpöä, ellei sitä hyödynnettäisi.

### **3.2 Nykytilanne ja edellytykset hyödyntämiselle**

Nykyisin tietokonesalien laitteiden tuottama lämpö ohjataan usein suoraan ulos tietokonesalista hyödyntämättä sen sisältämää lämpöenergiaa. Hukkalämmön hyödyntäminen yleistyy jatkuvasti, koska tietokonesalien tehojen kasvaessa myös hukkalämmön määrä kasvaa ja hyödyntämismahdollisuudet paranevat. [2, s. 12]

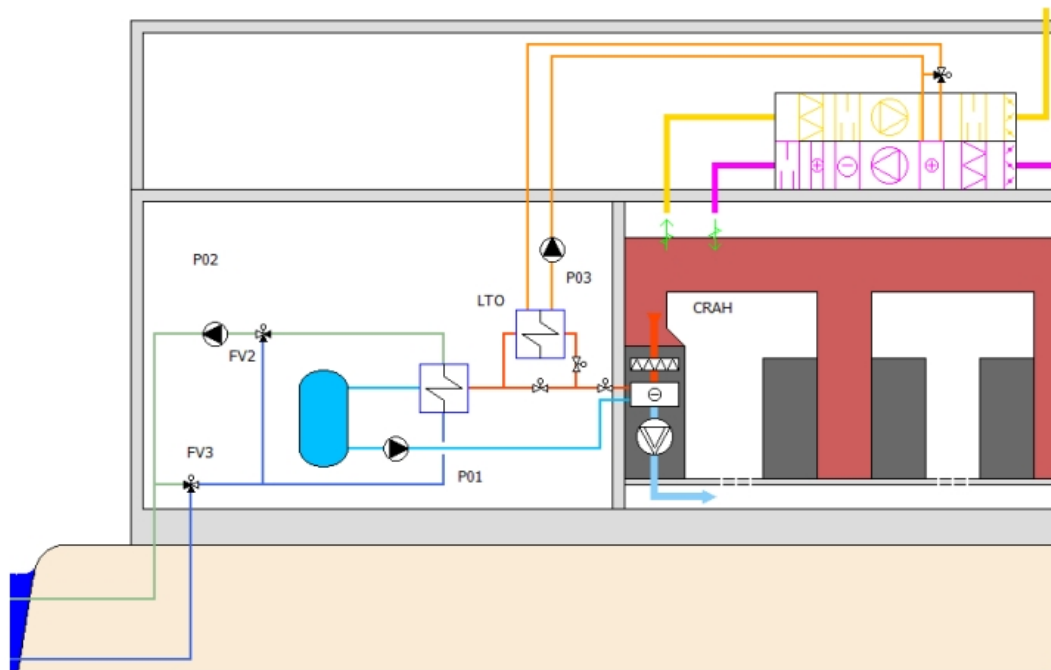
Konesalin hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksiin vaikuttavat tietokonesalin sijainti, koko, laitteet ja tekniset ominaisuudet sekä jäähdytysjärjestelmän tyyppi. Tietokonesalin lähistöllä tulee olla myös jokin kohde, jossa hukkalämpöä voidaan hyödyntää ja sille on oltava kysyntää. [2, s. 12.]

Hukkalämmön hyödyntämisen taloudellinen edellytys on, että hukkalämmön hyödyntämisellä tuotetun energian on oltava edullisempaa, kuin sillä korvattu energia. Lisäksi hukkalämmön tulee olla ilmaista tai hyvin edullista, siten että kustannuksia syntyy vain hukkalämmön siirtämisestä laitteistolle, jolla se hyödynnetään. Tuotetusta energiasta saatavalla säästöllä on katettava laitteiston elinkaarikustannusten lisäksi myös liityntöjen kustannukset riittävän lyhyellä takaisinmaksuajalla. [28, s. 63]

### **3.3 Hyödyntäminen lämmityksessä tai lämpimän käyttöveden tuotannossa**

Omassa kiinteistössä hukkalämpöä voidaan hyödyntää tilojen lämmityksessä radiaattoriverkoston, lattialämmityksen, ilmanvaihdon lämmityksen tai esilämmityksen kautta. Myös lumensulatusverkosto on mahdollinen käyttökohde hukkalämmölle. Tilojen lämmitystä ei kuitenkaan tarvita ympärivuotisesti, vaan lämmitystarve riippuu ulkoilman lämpötilasta. [2, s. 12-13.] Lämmintä käyttövettä sen sijaan tarvitaan lähes aina ympärivuotisesti ja tietokonesalien hukkalämpöä voidaankin hyödyntää myös käyttöveden esilämmityksessä [25, s. 54].

Helpon hyödyntäminen onnistuu tuloilman esilämmityksessä, kun ulkoilma on kylmää ja tarvitsee lämmitystä. Hukkalämmön hyödyntäminen tapahtuu lämmöntalteenotolla varustetun ilmanvaihtokoneen esilämmityspatterin avulla. Lämpimästä tietokonesalien poistoilmasta saadaan siirrettyä lämpöä talteen, kun vakioilmastointikoneilta palaava jäähdytysvesi ohjataan LTO -lämmönsiirtimen kautta, jossa se luovuttaa osan sitomastaan lämpöenergiasta LTO -piirissä kiertävään vesi-glykoli liuokseen. LTO -piirillä esilämmitetään ilmanvaihtokoneelle tuleva ulkoilma mahdollisimman lähelle tuloilman asetusarvoa piiriin liitetyn tuloilmaan esilämmityspatterin avulla. Jäähdytysverkoston paluuvesi kelpaa sellaisenaan tuloilman esilämmitykseen, eikä lämpöpumppua siis tarvita. [2, s. 12][5, s. 33]



**Kuva 9. Lämmön talteenotto CRAHiltä palaavasta jäähdytysvedestä ja hyödyntäminen tuloilman esilämmityksessä. [5]**

Lähteessä [26] on tutkittu 150-300 kW vedenjäähdytyskoneilla jäähdytetyn konesalin hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia 2500 m<sup>2</sup> kokoiseen toimistorakennuksen tuloilman esilämmitykseen, lattialämmitykseen ja lämpimän käyttöveden esilämmitykseen. Työn tulosten mukaan vain tuloilman esilämmitys oli taloudellisesti kannattava vaihtoehto, sillä lattialämmityksestä ja käyttöveden esilämmityksestä ei saada niin suuria säästöjä, että siihen olisi taloudellisesti järkevää investoida. Hukkalämpöä tuloilman esilämmitykseen hyödyntävän järjestelmän takaisinmaksuajaksi saatiin noin 15 vuotta. [26, s. 39-41]

Lähteessä [21] on tutkittu kuumavesijäähdytteisen 30-50 % käyttöasteella toimivan 5 MW konesalin hukkalämmön hyödyntämistä suoraan 60 800 m<sup>2</sup> kylpylähotellin sekä kahdeksan 382 m<sup>2</sup> majoitusmökin lämmitysverkostoon. Tulosten mukaan tietokonesalin ylijäämälämmöllä voidaan kattaa rakennusten lämmitysenergiantarve lähes täysin. [21, s. 59]

Ongelmana paluuveden lämmön hyödyntämisessä on tavallisissa jäähdytysjärjestelmissä veden matala lämpötila. Noin 15-30 °C vesi ei sellaisenaan riitä lämmitykseen (paitsi esilämmitykseen), mutta lämpöä voidaan siirtää tarvittavaan korkeampaan lämpötilatasoon lämpöpumpun avulla (Kuva 10).

[2, s. 12-13.] Lämpöpumpun avulla jäähdytysjärjestelmien paluuveden sisältämään lämpöenergiaa voidaan hyödyntää lämmityksessä radiaattoriverkostoon tai ilmanvaihdon lämmitysverkostoon.

Lähteessä [27] on tutkittu 100 kW konesalin hukkalämmön hyödyntämistä 9200 m<sup>2</sup> opetusrakennuksen lämmitysverkkoon ja käyttöveden esilämmitykseen lämpöpumpun avulla. Työn tulosten mukaan lämpöpumppujärjestelmän takaisinmaksuaika on 2 vuotta ja järjestelmän elinkaarikustannukset ovat kahdessakymmenessä vuodessa nykyarvoltaan liki 280 000 € edullisemmat kuin vapaajäähdytystä hyödyntävällä vedenjäähdytyskoneella tuotettava jäähdytys. [27, s. 42-58]

Olemassa olevan kiinteistön lämmitystarpeiden energiankulutus ja tehontarpeet on usein mittaroitu, jolloin järjestelmien lämmitystarve saadaan helposti tietoon. Tarvittaessa lämmitysverkoston, ilmanvaihdon lämmityksen ja lämpimän käyttöveden energiantarve voidaan myös laskea tai selvittää erillisten mittausten avulla. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää myös viereisissä rakennuksissa, kuten esimerkiksi naapurikiinteistön uima-altaan lämmittämiseen tai sulana pidettävien ulkoilualueiden tai puolilämpimien tilojen lämmitykseen. Lämmön siirto pitkiä välimatkoja kasvattaa kuitenkin lämpöhäviöitä ja rakennuskustannuksia. [2, s. 13.]

### **3.3.1.1 Lämpöpumppu**

Lämpöpumppu voidaan toteuttaa erilaisilla toimintaperiaatteilla. Kaikilla lämpöpumppujen toimintaperiaatteilla on kuitenkin kolme yhteistä piirrettä:

1. Lämpölähteen (hukkalämmön) lämmön lämpöenergian hyödyntäminen
2. Kiertoineen lämpötilatason nostaminen
3. Lämmön luovuttaminen lämmitettävään kohteeseen korkeammassa lämpötilassa [28, s. 16]

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan pätee:

$$Q_L + W - Q_H = 0 \rightarrow Q_L + W = Q_H \quad (3.1)$$

$Q_L$  = matalammasta lämpötilasta otettu lämpö

$Q_H$  = korkeampaan lämpötilaan hyödynnetty lämpö

$W$  = systeemiin tehty työ (kompressorin)

Ja termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan on oltava  $W > 0$

Lämpöpumpun lämpökerroin, eli COP lasketaan kaavalla

(3.2)

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W} \quad (3.3)$$

Lämpöpumpulla toteutetun jäähdytyksen kylmäkerroin voidaan laskea kaavalla:

$$EER_{HP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_H - W}{W} = \frac{Q_H}{W} - 1 = COP_{HP} - 1 \quad (3.4)$$

Ideaalisen Carnot-lämpöpumpun lämpökerroin on:

$$COP_{HP\_C} = T_L / (T_H - T_L) + 1 = T_H / (T_H - T_L) \quad (3.5)$$

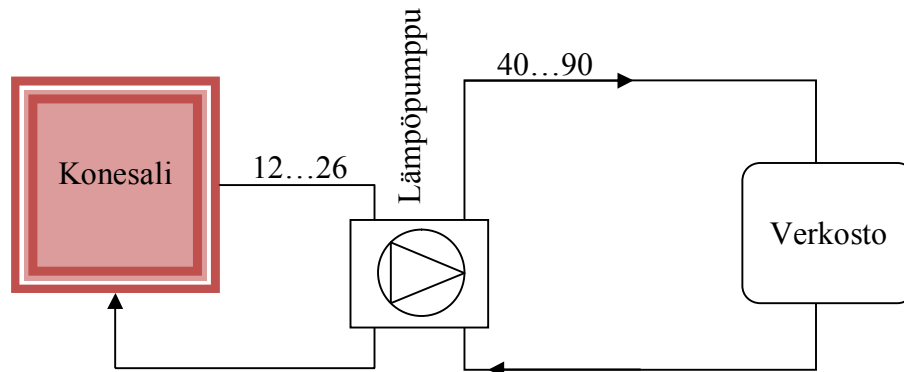
$T_L$  = matalamman lämpötilan lämpövarasto (°K)

$T_H$  = korkeamman lämpötilan lämpövarasto (°K)

Josta voidaan todeta, että mitä pienempi lämpötilatasojen ero on, sitä parempi lämpöpumpun lämpökerroin on.

Tyypillisessä kompressorilämpöpumpussa on kaksi lämmönvaihdinta, höyrystin ja lauhdutin. Höyrystimessä lämmönkeruupiiristä saatu lämpö höyrystää lämpöpumpussa kiertävän kylmäaineen. Lämpöä siirtyy lämmönkeruupiiristä kylmäaineeseen, kun nestemäinen kylmäaine muuttuu höyryksi. Höyrystimen jälkeen lämpöpumpun kompressorin imee höyrystyneen kylmäaineen ja nostaa höyryn painetta ja lämpötilaa. Kuuma ja korkeapaineinen kylmäaine kulkee lauhduttimeen, jossa lämpöä siirtyy kylmäaineesta lämmitysjärjestelmän verkostoon, kun lämmitysverkoston vesi jäähdyttää kylmäainehöyryä.

Lauhduttimen jälkeen jäähtynyt kylmäaine kulkee paineenalennusventtiilin kautta takaisin höyrystimelle. Pienenalennusventtiilissä kylmäaineen lämpötila ja paine laskevat. [29, s. 12-13]



Kuva 10. Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpun avulla

### 3.3.1.2 Kaksivaiheinen lämpöpumppu

Kaksivaiheinen lämpöpumppuprosessi sisältää kaksi tasoa, jotka luodaan kahdella kompressorilla. Ensimmäinen kompressorin luo matalamman lämpötilatason ja toinen korkeamman lämpötilatason. Kaksivaiheiset lämpöpumppuprosessit voidaan luokitella yhdistelmäprosesseihin ja kaskadiprosesseihin. Yhdistelmäprosessissa kaksi kompressorin on kytketty samaan sarjaan samaan kylmäainepiiriin. Kaskadiprosessissa kaksi kylmäainepiiriä on kytketty sarjaan ja piirit yhdistetty välilämmönsiirtimellä (Kuva 11). Välilämmönsiirtimessä matalamman lämpötilan piirin lauhduttimen luovuttama lämpö siirtyy korkeamman lämpötilan piirin höyrystimeen. Kaskadiprosessissa kylmäainepiireissä voidaan käyttää eri kylmäaineita matalamman ja korkeamman lämpötilan piireille. Perinteiseen lämpöpumppuprosessiin verrattuna kaksivaiheisessa prosessissa on pienempi puristussuhde ja suurempi puristustehokkuus kompressorin kohti. [30, s. 3613-3614]

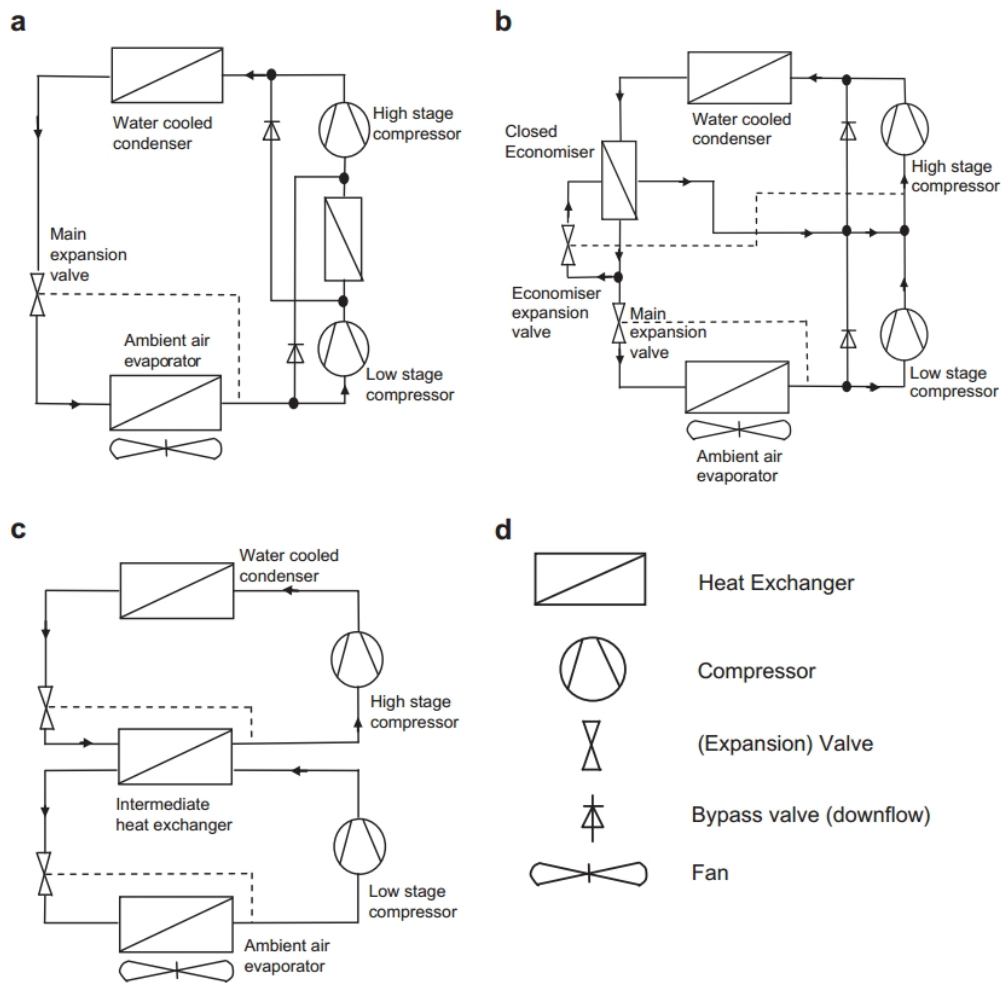


Fig. 2. Schematics of (a) two-stage cycle with intercooler, (b) two-stage cycle with closed economizer, (c) cascade cycle, and (d) legend [4].

Kuva 11. Kaksivaiheisten lämpöpumppujen kaaviot: a. yhdistelmäprosessi välijäähdyttimellä, b. yhdistelmäprosessi suljetulla esilämmittimellä, c. kaskadiprosessi.

Hukkalämmön hyödyntämisen kannalta on eduksi, että kaksivaiheisessa lämpöpumppuprosessissa saavutetaan korkeampi lämpötila (n. 80-90 °C), jolloin hukkalämpöä on helpompi hyödyntää. Kaksivaiheiset lämpöpumput ovat kuitenkin investointikustannuksiltaan merkittävästi yksikompressorisia lämpöpumppuja kalliimpia. Lisäksi kaksivaiheisten lämpöpumppujen COP on tyypillisesti yksikompressorisia lämpöpumppuja heikompi johtuen lämpötilatasojen suuremmasta lämpötilaerosta. [30, s. 3614]

### 3.3.2 Hyödyntäminen kaukolämpöverkkoon

Kaukojäähdytystä käyttävien tietokonesalien hukkalämpö voidaan yleensä myydä energiayhtiön kaukolämpöverkkoon (Kuva 12), jossa sitä käytetään rakennusten

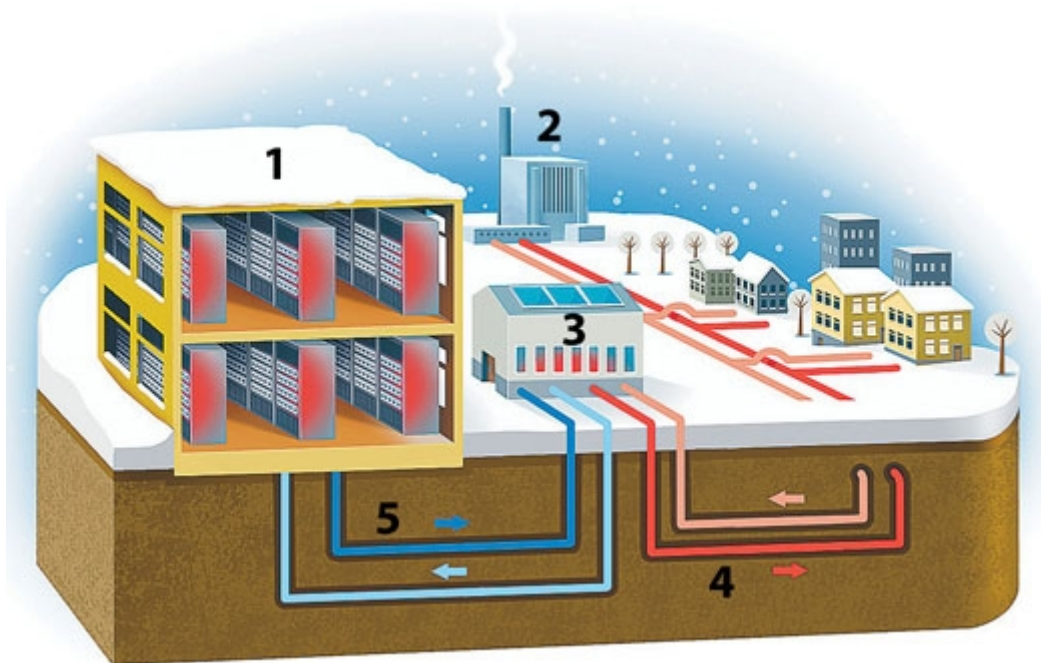
ja käyttövesien lämmitykseen. Hukkalämmön siirtäminen kaukolämpöverkkoon lisää tietokonesalin nettoenergiatehokkuutta. [2, s. 9, 12]

Jos hukkalämmön lämpötila on yli 70 °C, voidaan sitä hyödyntää kesällä suoraan kaukolämmön menopuolelle lämmönsiirtimen kautta, kun kaukolämmön menoveden lämpötila on alle 70 °C. Jos hukkalämmön lämpötila on yli 55 °C, voidaan se siirtää kaukolämpöverkoston paluuveteen suoraan lämmönsiirtimen välityksellä. Jos lämpötila on alle 55 °C, täytyy sen lämpötila nostaa lämpöpumpun avulla riittävälle tasolle ennen lämmönsiirrintä [31, s. 4]. Matalalämpöisestä hukkalämmöstä saadaan lämpöpumpun avulla tuotettua hyvällä lämpökertoimella ( $COP > 4$ ) noin 60...70 °C asteista vettä, joka voidaan hyödyntää kaukolämmön paluuverkon lämmityksessä [25, s. 51]. Lämpötilan nostaminen voidaan tehdä kiinteistön lämpöpumpulla tai erillisessä lämpöpumppulaitoksessa (Kuva 12) [31, s. 4].

Helsingissä muun muassa kaukojäähdytystä käyttävistä DNA:n ja Telecity Groupin (ent. Academican) tietokonesaleista hyödynnetään hukkalämpö kaukokylmäverkon kautta kaukolämpöverkkoon, jossa sitä käytetään rakennusten lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden tuottamiseen [32, 33]. Myös Yleisradion ja Tiedon tietokonesalien hukkalämpöä hyödynnetään kaukolämpöverkkoon [14, s. 11].

Hukkalämmön osuus Suomen kaukolämmön tuotannosta oli yhteensä noin 2 % vuonna 2013 [34]. Vertailuna vastaava luku oli Ruotsissa noin 6,4 % vuonna 2013. [35, s. 10]





Kuva 12. Kaukojäähdytyksellä varustetun tietokonesalin hukkalämpö hyödynnetään kaukolämpöverkkoon. 1. tietokonesali, 2. voimalaitos, 3. lämpöpumppulaitos, 4. kaukolämpöverkko, 5. Jäähdytysputkisto [36]

Kaukolämpöyhtiöt maksavat kaukolämpöverkkoon syötetystä ylijäämälämmöstä yleensä kaukolämmön tuotantokustannusten perusteella. Jotta energiayhtiön olisi taloudellisesti järkevää ostaa ylijäämälämpöä, on ostohinnan oltava edullisempi kuin tuotantokustannusten. Kaukolämpöverkkoon energiayhtiölle myytävästä hukkalämmöstä ei siis saada luonnollisestikaan samaa yksikköhintaa kuin Energiayhtiöltä ostettavasta kaukolämmöstä maksetaan. Kaukolämmön tuotantokustannukset vaihtelevat merkittävästi vuoden sisällä, joten myös ostohinta voi vaihdella dynaamisesti. [35, s. 9]

Hukkalämmön hyödyntämiseen tarvittavat laitteistoinvestoinnit voidaan toteuttaa kokonaan jommankumman sopimusosapuolen toimesta tai yhdessä. Sopimus ja hyödynnettävän energian hinnoittelu vaihtelevat investointien mukaan. [35, s. 19] Voidaan esimerkiksi sopia, että energiayhtiö vastaa lämpöpumppujen hankinnasta, investoinnista ja huollosta sekä energiasta. Tällöin tietokonesali jäähdytetään energiayhtiön lämpöpumpuilla ja energiayhtiö hyödyntää tietokonesalin hukkalämmön kaukolämpöverkkoon ilman erillistä laskutusta energian mukaan.

Kaukolämpöliiketoiminta perustuu Suomessa avoimiin markkinoihin ja eri osapuolten välisiin sopimuksiin, eikä sitä säädellä erityislainsäädännöllä. Tämä mahdollistaa räätälöityjen sopimusten laatimisen sopijaosapuolien välillä [35, s. 10-11]. Kaukolämpöverkkoja ei ole kuitenkaan avattu kilpailulle siten, että kuka tahansa toimija voisi syöttää tuottamaansa lämpöä kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöverkon omistajalla ei ole velvoitetta ottaa tarjottua lämpöä vastaan. [37, s. 62]

Eri osapuolien tarpeet ja tekniset vaatimukset vaihtelevat kohteesta ja tilanteesta riippuen, joten kahdensuuntaisessa kaupassa sopimuskäytännöt ja hinnoittelumallit eivät ole vakiintuneita. Tämä vaatii sopijaosapuolilta syventymistä sopimusteknisiin asioihin ja voi myös hankaloittaa sopimusprosessia. [35, s. 10-11]

Energiayhtiöiden suhtautuminen hukkalämmön hyödyntämiseen ja ostamiseen on positiivinen, mikäli taloudelliset ja tekniset vaatimukset täyttyvät. Myös hukkalämmön hyödyntämisestä saatavat ympäristölliset sekä imagolliset hyödyt kiinnostavat energiayhtiöitä ja hukkalämmön tuottajia. Energiayhtiöiden kiinnostus hukkalämmön hyödyntämiseen voi kuitenkin pienentyä, mikäli energiayhtiöllä on myös sähkön ja lämmön yhteistuotantoa, sillä lämmön siirtäminen kaukolämmön paluupuolelle nostaa paluuverkoston nesteen lämpötilaa ja heikentää CHP-laitoksen hyötysuhdetta. Hukkalämpöä tulee olla saatavilla riittävän paljon, sillä pienet lämpömäärät lisäävät verkon säätöön ja hallinnoimiseen tarvittavaa työmäärää ja kuluja paljon verrattuna saatavaan hyötyyn. [35, s. 11-12]

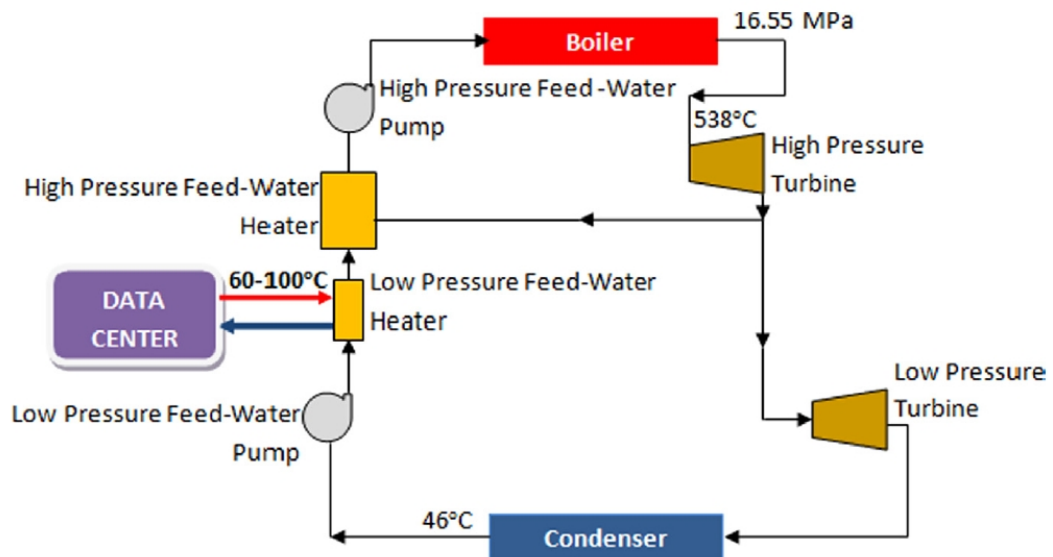
Hukkalämpöä ostamalla energiayhtiö voi korvata omaa kalliimpaa lämmöntuotantoa, kun ostohinta on kaukolämmön rajatuotantokustannuksia alhaisempi. Hukkalämmön hyödyntäminen auttaa energiayhtiöitä tavoitteissa vähentää ja luopua hiilen käytöstä kaukolämmön tuotannossa. Lisäksi energiayhtiö voi korvata omaa huippu- ja varakapasiteettituotantoa tai välttää lisäkapasiteetin rakentamista ostamalla hukkalämpöä. [37, s. 62-63]

### 3.3.3 Hajautettu lämmöntuotanto tietokonesalien avulla

Ympäristömyötäinen tietotekniikka (Environmentally opportunistic computing (EOC)) on konsepti, jossa tietokonesalit ajatellaan joukoksi hajautettuja lämmöntuotantolaitoksia. Suurien ja keskitettyjen tietokonesalien sijaan tietokonesalit sijoitetaan hajautetusti useisiin kiinteistöihin, jotka voivat hyödyntää tietokonesalien hukkalämpöä lämmitykseen tai lämpimän käyttöveden lämmitykseen. [38, s. 41-42]

### 3.4 Hyödyntäminen höyryturbiinivoimalaitoksessa

Mikäli tietokonesali sijoitetaan höyryturbiinivoimalaitoksen yhteyteen, voidaan tietokonesalien hukkalämpöä hyödyntää veden esilämmittämiseen voimalaitosten höyryturbiiniprosessissa (Rankine-prosessissa) (Kuva 13). Tietokonesalien hukkalämmön matala lämpötila kuitenkin estää kattilan korvaamisen kokonaan hukkalämmöllä, mutta hukkalämpöä voidaan käyttää kattilaan menevän veden esilämmittämiseen. [39, s. 630]



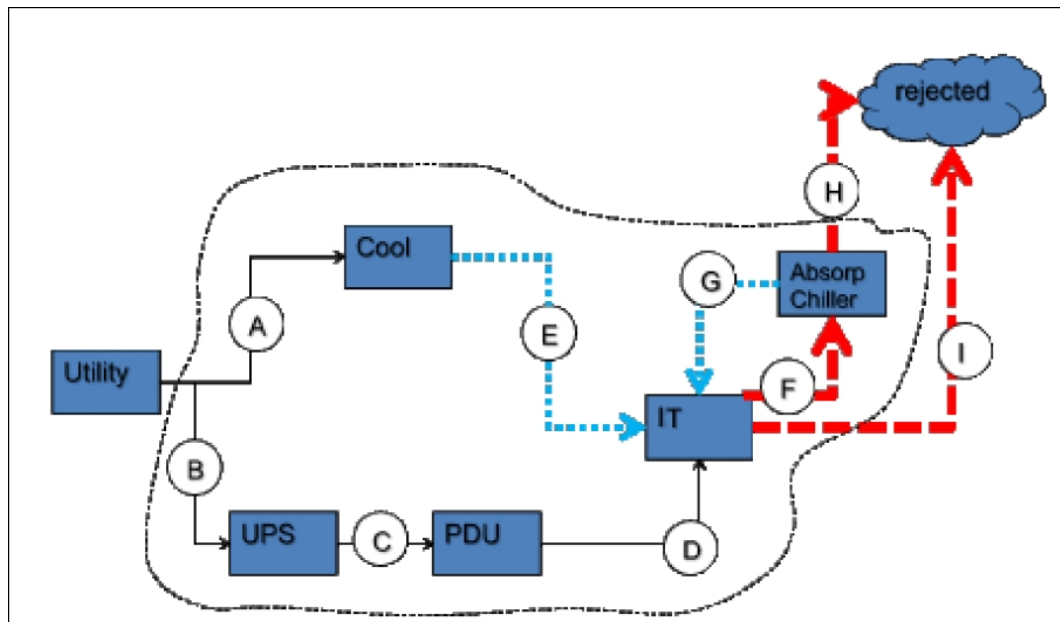
Kuva 13. tietokonesalin hukkalämmön hyödyntäminen höyryturbiiniprosessissa [39]

Hukkalämmön hyödyntäminen voimalaitosten höyryturbiiniprosessissa on tehokkainta suoraan tietotekniikkalaitteisiin asennettua kaksifaasijäähdytystä käyttävissä tietokonesaleissa tai kuumavesijäähdytteisissä konesaleissa, mutta on myös mahdollista tavallista nestejäähdytystä tai ilmajäähdytystä käyttävissä

tietokonesaleissa, mikäli hyödynnettävän energian lämpötilaa nostetaan lämpöpumpun avulla. [39, s. 630]

### 3.5 Hyödyntäminen absorptiojäähdytyksessä

Absorptiojäähdytys perustuu kiertoprosessiin jossa jäähdytysenergiaa tuotetaan lämpöenergian avulla [13, s. 17]. Absorptiojäähdytysprosessissa työaineparin muodostavat kylmäaine ja absorptioaine [40, s. 16]. Tietokonesalien hukkalämpöä on mahdollista käyttää tietokonesalin tai konesalin ulkopuolisten tilojen jäähdyttämiseen absorptiojäähdytysprosessin avulla (Kuva 14) [39, s. 631].



Kuva 14. tietokonesalin hukkalämmön hyödyntäminen absorptiojäähdytyksessä. [50]

Absorptiojäähdytysjärjestelmät voivat toimia matalimmillaan 70-90 °C menovesilämpötiloilla, joten tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet ovat parhaat kaksifaasijäähdytystä tai kuumavesijäähdytystä käyttävissä tietokonesaleissa, mutta hukkalämmön hyödyntäminen on myös mahdollista tavallista nestejäähdytystä tai ilmajäähdytystä käyttävissä tietokonesaleissa, jos hyödynnettävän energian lämpötilaa kohotetaan lämpöpumpun avulla riittävän korkeaksi. [39, s. 631-633]

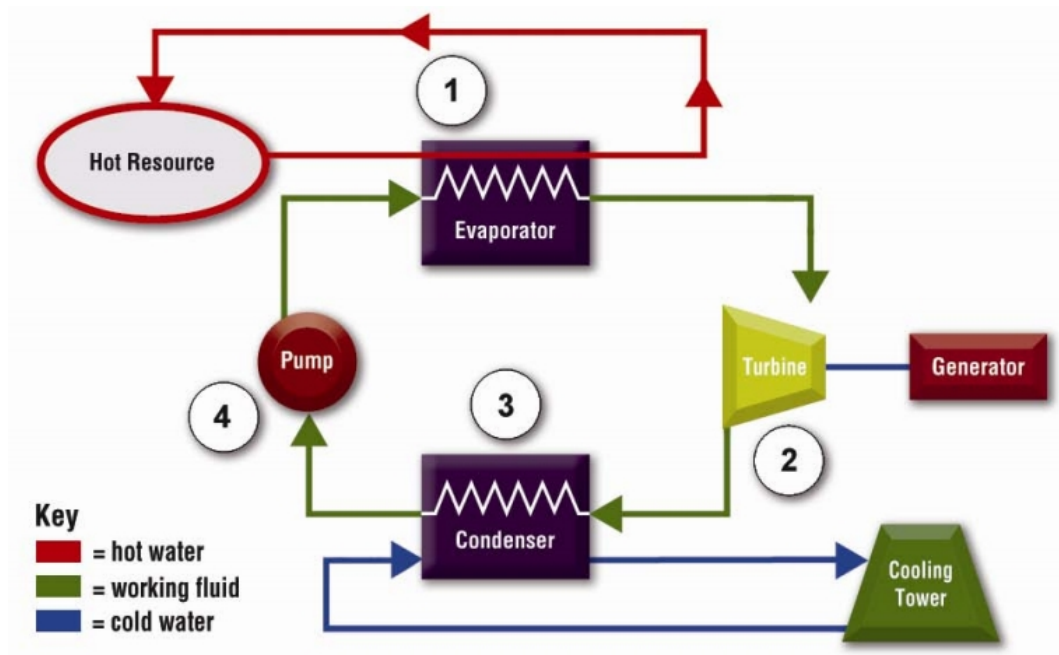
Absorptiojäähdytyksessä hukkalämpöä hyödyntävä järjestelmä on mahdollista myös jälkiasentaa olemassa oleviin tietokonesaleihin, mikäli se on tilan puolesta

mahdollista ja mikäli se voidaan asentaa aiheuttamatta keskeytyksiä konesalin toiminnalle. [39, s. 631, 633]

### **3.6 Hyödyntäminen ORC-prosessissa**

Organic Rankine Cycle (ORC) on prosessi, joka muistuttaa höyryturbiinin toimintaa, mutta kiertoaineena on veden sijaan käyttökohteeseen sopiva orgaaninen aine. Prosessissa käytettävä orgaaninen aine höyrystyy ja lauhtuu prosessin eri osissa vesikierron tapaan (Kuva 15) [41, s. 10-12] Usein nesteenä käytetään öljyä, jolla on huomattavasti alhaisempi latenttilämpö kuin vedellä. Sähkön tuottaminen ORC-prosessissa vaatii vähintään 65 °C lämpötilaa hukkalämmöltä [39, s. 633], mutta hyötysuhde on merkittävästi parempi, mikäli lämpötila on yli 100 °C [31, s. 10]. ORC-prosessin kokonaishyötysuhde on tyypillisesti 10 -20 %, mutta riippuu lämpötilasta ja kiertoaineen ominaisuuksista [43 s. 25-26].

ORC-prosessin hyödyntämismahdollisuudet ovat parhaat kaksifaasijäähdytystä tai kuumavesijäähdytystä käyttävissä tietokonesaleissa, mutta se soveltuu myös nestejäähdytettyihin kohteisiin, mikäli paluuveden lämpötilaa nostetaan lämpöpumpun kompressorin avulla. Ilmajäähdytystä käyttävien tietokonesalien hukkalämpöä voidaan hyödyntää ORC-prosessissa, jos hukkalämmön lämpötilaa nostetaan lämpöpumpulla ennen sen hyödyntämistä. [39, s. 633-634]



Kuva 15. ORC -prosessin toimintakaavio [42]

Mikäli hukkalämpöä on saatavana jatkuvasti ORC-prosessin mitoitusasteen verran, saadaan laaja huipunkäyttöaika, mikä on sähköntuotannon kannalta hyvä. [41, s. 12]

ORC-prosessin avulla tietokonesalien hukkalämpöä voidaan käyttää sähkön tuottamiseen tietokonesalin yhteydessä. ORC-prosessi ei vaadi tietokonesalin sijainnilta erityisvaatimuksia, joten ORC-prosessi voidaan jälkiasentaa myös olemassa olevaan tietokonesaliin. [39, s. 633-634]

Haasteena tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämisessä ORC-prosessissa on prosessin matala hyötysuhde (5-20 %) tietokonesaleista saatavilla lämpötiloilla, jolloin investointi ei maksa itseään koskaan takaisin, eikä siis kannata [39, s. 633-634]. Nykyisillä sähkön hinnoilla hukkalämpöä hyödyntävien ORC-laitosten takaisinmaksuaika on teollisuudesta saatavan hukkalämmön lämpötiloillakin (100-350 °C) usein yli 10 vuotta [41, s. 12].

### 3.7 Hyödyntäminen pietsosähkön tuottamisessa

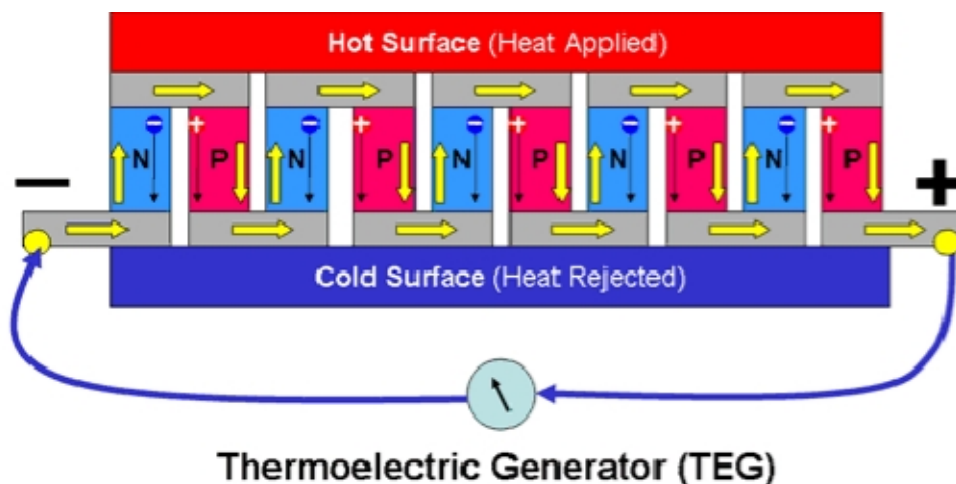
Pietsosähköisessä ilmiössä pystytään tuottamaan sähköä mekaanisen rasituksen avulla. tietokonesalien tapauksessa olisi mahdollista hyödyntää poistoilman

turbulenssin värähtelyä. Piettosähkön tuottaminen on riippumaton lämpötilasta ja sitä voitaisiin soveltaa ainoastaan ilmajäähdytteisiin tietokonesaleihin pienessä paikallisessa sähköntuotannossa. [39, s. 634]

Haasteena piettosähkön tuotannossa on matala tuotettu sähköteho, huono energian muunnoksen hyötysuhde sekä korkeat kustannukset [39, s. 634]. Piettosähköntuotannon hyötysuhde on nykyään noin 1 % ja hinta 8000 e/W, joten hukkalämmön hyödyntäminen piettosähkön tuotannossa ei ole lainkaan järkevää millään tasolla. [43, s. 28]

### 3.8 Hyödyntäminen termosähkön tuotannossa

Termosähkön tuotannossa tietokonesalin hukkalämpö voidaan muuntaa sähköenergiaksi termosähkömoduulien avulla [39, s. 634]. Termosähkön tuotanto perustuu kahden eri metallin vapaiden varauksien erilaiseen liikkuvuuteen eri lämpötiloissa, jolloin metallien välille syntyy jännite-ero. [44, s. 135]



Kuva 16. Termosähkön tuotanto

Termosähkön tuotannon hyötysuhde on parhaimmillaan tietokonesalien hukkalämmön lämpötiloja korkeammilla lämpötiloilla. Tyypillisesti vaadittava lämpötila on vähintään 80-170 °C, joten tekniikkaa voitaisiin mahdollisesti soveltaa kaksifaasijäähdytyksellä tai kuumavesijäähdytyksellä varustetuissa tietokonesaleissa. Nestejäähdytyksellä tai ilmajäähdytyksellä varustetuissa

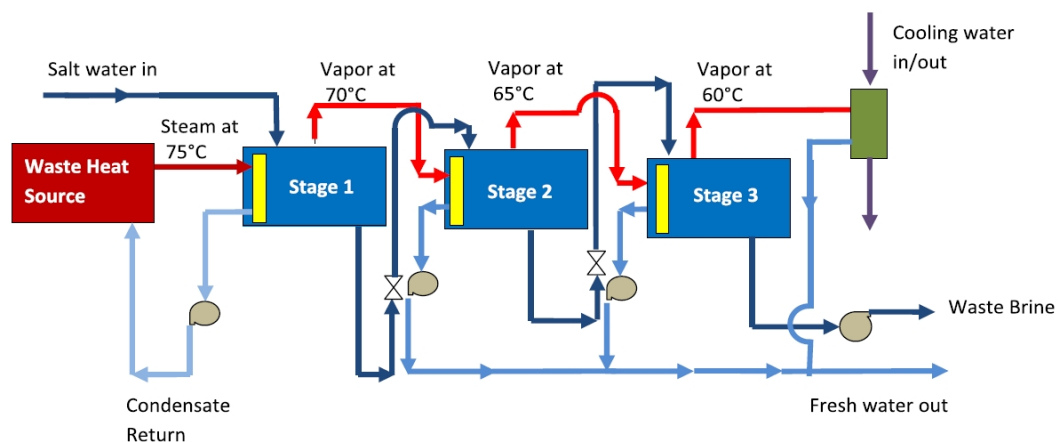
kohteissa tekniikkaa voidaan hyödyntää, jos hyödynnettävän energian lämpötilaa nostetaan ennen termosähkömoduuleja lämpöpumpun avulla. [39, s. 634-635]

Ongelmana termosähkötuotannon hyödyntämisessä on korkeiden vaadittavien lämpötilojen lisäksi huono energian muunnoksen hyötysuhde sekä termosähkömoduulien korkeat kustannukset, joten termosähkön tuotanto ei ole kannattava tapa hyödyntää konesalien hukkalämpöä. [39, s. 634-635]

### 3.9 Hyödyntäminen veden suolanpoistossa

Konesalien hukkalämpöä on mahdollista hyödyntää veden suolanpoistossa eli desalinaatiossa käyttämällä monivaihelauhdutustislausmenetelmää (*Multiple Effect Distillation*, MED) (Kuva 17). Suolanpoiston avulla merivedestä voidaan valmistaa puhdasta juomavettä.

Monivaihelauhdutustislaus vaatii hukkalämmöltä vähintään 75 °C lämpötilaa, joten tekniikkaa voidaan soveltaa kaksifaasijäähdytyksellä varustetuissa tietokonesaleissa sekä kuumavesijäähdytyksessä konesaleissa, joissa lämpötilat ovat riittävän korkeat. Menetelmä ei sovellu ilmajäähdytteisille tietokonesaleille, ellei jäähdytysveden lämpötilaa nosteta ensin lämpöpumpulla. [39, s. 635]. MED -prosessissa käytetään lämmönsiirintä, jossa höyrystettävä vesi kiehuu lämmönsiirtopinnalla ja muodostuvaa höyryä käytetään seuraavassa vaiheessa lämmön lähteenä [45, s. 27].



Kuva 17. Kolmevaiheinen monivaihelauhdutustislausprosessi, jossa ensimmäinen vaihe hyödyntää tietokonesalin hukkalämpöä [39]



Hyödyntämällä tietokonesalin hukkalämpöä meriveden suolanpoistossa on teoriassa mahdollista korvata vedenjäähdytyskone monivaihelauhdutustislausjärjestelmällä. [39, s. 635]

Puhtaan veden tuotannolle ei usein ole tarvetta tietokonesalien yhteydessä, joten tekniikan hyödyntämismahdollisuudet ovat rajatut, eivätkä prosessin vaatimat lämpötilatasot ole optimit konesalien hukkalämmön hyödyntämiseen. [39, s. 635]

### **3.10 Hyödyntäminen biovoimalaitoksissa**

Konesalien hukkalämpöä voidaan hyödyntää biomassan kuivatukseen biovoimalaitoksissa tai biokaasun tuotannossa tehostamaan biomassan anaerobista käymistä. [46, s. 435]. Biomassan kuivatus lisää voimalaitoksen kapasiteettia, parantaa hyötysuhdetta ja vähentää savukaasupäästöjä [41, s. 14]. Biomassan kuivatus on tehokkainta yli 60 °C lämpötiloilla, joten hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet ovat parhaat kaksifaasijäähdytystä tai lämminvesijäähdytystä käyttävissä tietokonesaleissa. Biomassan kuivatukseen riittää joissain tapauksissa myös 45 °C lämpötila, joten myös ilmajäähdytteisten tietokonesalien hukkalämpöä olisi mahdollista hyödyntää biopolttoaineen tuotannossa. [39, s. 636] Jotta hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää biovoimalaitoksissa, edellyttäisi se konesalin sijaitsemista voimalaitoksen yhteydessä.

## 4 Konesalin energiatehokkuuden mittarit

Jotta tietokonesalien energiatehokkuutta voidaan hallita, arvioida ja kehittää, on sen mittaamiseen kehitetty erilaisia indikaattoreita, kuten PUE, ERE, ERF, CADE ja CUPS. Näistä mittareista selvästi käytetyin ja vakiintunein on tällä hetkellä PUE, jonka käyttö on globaalisti yleistä. Myös EREn käyttö on viime aikoina lisääntynyt hukkalämmön hyödyntämisen yleistyttyä.

### 4.1 PUE eli Power Usage Effectiveness

PUE eli Power Usage Effectiveness on tietokonesalien energiatehokkuuden tunnusluvuista käytetyin. PUE on tietokonesalien energiatehokkuutta kuvaava luku, jossa tietokonesalin kokonaisenergian kulutusta verrataan tietokonesalin tietotekniikkalaitteiston kulutukseen. PUE indikoi tietokonesalin talotekniikan ja fyysisen infrastruktuurin energiatehokkuutta, eikä mittaa tietotekniikkalaitteiston energiatehokkuutta. Hetkellinen PUE-arvo vaihtelee mm. ulkoilman olosuhteiden, salin lämpötilan ja käyttöasteen mukaan. PUE ei huomioi mahdollista hukkalämmön hyödyntämistä, joten PUEn teoreettinen minimiarvo on 1. [2, s.18 ; 47]

Mitä pienempi PUE-arvo on, sitä parempi energiatehokkuus tietokonesalin talotekniikkalaitteistolla on. Tyypillisessä tietokonesalissa palvelimet ja talotekniset järjestelmät kuluttavat molemmat noin puolet palvelinkeskuksen kokonaisenergiasta, jolloin  $PUE = 2$ . Nykyisin rakennettavat energiatehokkaat tietokonesalit voivat päästä parhaimmillaan arvoon  $PUE \leq 1,15$  vuoden mittausjaksolla. Tietokonesalin suunnitteluvaiheessa arvioitu PUE ei välttämättä vastaa mitattua arvoa, jos tietokonesalin käyttöaste ei ole lähellä täyttä kapasiteettia. [2, s.18; 47]

Alun perin Green Grid määritteli PUEn vuonna 2007 tietokonesalin tehojen mukaan, mistä myös mittarin nimi johtuu. Kuitenkin vuonna 2009 Green Grid julkaisi ohjeet, jossa linjasi PUEn käytettäväksi energioille tehojen sijaan. [47]

PUE lasketaan kaavalla (4.1): [48, s. 11]

$$PUE = \frac{E_{tot}}{E_{it}} \quad (4.1)$$

$E_{tot}$  = tietokonesalin kokonaisenergian kulutus, joka sisältää tietotekniikkalaitteistot, jäähdytysjärjestelmän, ilmanvaihdon, valaistuksen, sähköjakelun, UPS -laitteiston ja muiden tietokonesalia palvelevien järjestelmien energiankulutuksen.

$E_{it}$  = tietokonesalin tietotekniikkalaitteiston energiankulutus

Konesalitoimijat voivat käyttää hyviä PUE-arvoja markkinoidessaan konesalien energiatehokkuutta ja parantaessaan yrityksen ympäristöimagoa. Konesalitoimijoiden kesken esiintyy myös kilpailua parhaasta PUE-arvosta. [49, s. 157]

#### 4.1.1 pPUE eli Partial Power Usage Effectiveness

Jos tietokonesalista saadaan laskettua rajatun osa-alueen kokonaisenergiankulutus ja tietotekniikkalaitteiston energiankulutus, voidaan tällöin laskea alueen pPUE eli partial Power Usage Effectiveness. Rajattu osa-alue voi olla fyysinen tai muulla tavalla määritetty, esimerkiksi: tietokonesalin tietyn tilan pPUE, kahdennettujen laitteiden pPUE tai tiettynä vuonna asennettujen laitteiden pPUE. Alueen pPUE lasketaan vastaavalla kaavalla kuin PUE (4.2)[48, s. 59-62]:

$$pPUE_n = \frac{E_{tot\_n}}{E_{it\_n}} \quad (4.2)$$

$E_{tot\_n}$  = rajatun alueen kokonaisenergiankulutus

$E_{it\_n}$  = rajatun alueen tietotekniikkalaitteiston energiankulutus

n = rajatun alueen indeksi

## 4.2 ERE eli Energy Reuse Effectiveness

ERE eli Energy Reuse Effectiveness on yhdysvaltalaisen ITC-alan toimijoista muodostuvan Green Grid -yhdistyksen kehittämä tietokonesalien energiatehokkuuden mittari, joka ottaa huomioon myös hyödynnetyn

hukkalämmön. ERE on kehitetty PUEn pohjalta ja sitä on myös kutsuttu nimellä NPUE eli Net Power Usage Effectiveness. ERE lasketaan kaavalla (4.3). [50, s. 8]

$$ERE = \frac{E_{net}}{E_{it}} = \frac{E_{tot} - E_{re}}{E_{it}} \quad (4.3)$$

$E_{net}$  = tietokonesalin nettoenergiankulutus

$E_{it}$  = tietokonesalin tietotekniikkalaitteiston energiankulutus

$E_{tot}$  = tietokonesaliin kokonaisenergiankulutus

$E_{re}$  = tietokonesalista hyödynnetty hukkalämpö

ERE ei mittaa hyödynnettävän hukkalämmön laatua tai ota kantaa hyödyntämisen tehokkuuteen, vaan se huomioi ainoastaan hyödynnettävän hukkalämmön määrän.

#### 4.2.1 ERF eli Energy Reuse Factor

ERF eli Energy Reuse Factor on EREn yhteydessä määritelty tunnusluku, joka ilmoittaa, mikä osuus tietokonesalin kokonaisenergiasta on hyödynnetty hukkalämpönä konesalin ulkopuolella. [50, s. 9-10]

$$ERF = \frac{E_{re}}{E_{tot}} \quad (4.4)$$

$E_{tot}$  = tietokonesaliin kokonaisenergiankulutus

$E_{re}$  = tietokonesalista hyödynnetty hukkalämpö

ERF voi saada arvoja väliltä [0, 1]. Arvo 0 tarkoittaa, että tietokonesalin hukkalämpöä ei hyödynnetä lainkaan ja arvo 1, että kaikki tietokonesalin käyttämä energia otetaan talteen ja hyödynnetään uudelleen. ERF ei myöskään mittaa hyödynnettävän hukkalämmön laatua, vaan se huomioi ainoastaan hyödynnettävän hukkalämmön määrän.

ERE voidaan määritellä myös PUEn ja ERF:n avulla seuraavasti:

$$ERE = (1 - ERF) * PUE \quad (4.5)$$

Kaavasta huomataan, että pätee:

$$ERF = 0 \Rightarrow ERE = PUE \quad (4.6)$$

Siis jos hukkalämpöä ei hyödynnetä, ovat ERE ja PUE yhtä suuret. Tästä seuraa, että alle 1.0 ERE-arvoa ei voida saavuttaa ilman hukkalämmön hyödyntämistä. [50]

### 4.3 Muut energiatehokkuuden mittarit

#### 4.3.1 DCIE eli Data Center Infrastructure Efficiency

Myös PUE:n käänteislukua DCIE eli Data Center Infrastructure Efficiency voidaan käyttää energiatehokkuuden mittarina, mutta PUE on kansainvälisesti paljon käytetympi ja vakiintuneempi tunnusluku. DCIE lasketaan kaavalla (4.7) [47, s 5].

$$DCIE = \frac{1}{PUE} = \frac{E_{it}}{E_{tot}} \quad (4.7)$$

$E_{tot}$  = tietokonesalin kokonaisenergian kulutus

$E_{it}$  = tietokonesalin tietotekniikkalaitteiston energiankulutus

#### 4.3.2 DCNE eli Data Center Net Efficiency

Samoin ERE:n käänteislukua DCNE eli Data Center Net Efficiency voidaan käyttää energiatehokkuuden mittarina, mutta ERE on huomattavasti yleisempi ja vakiintuneempi mittari, joka huomioi myös konesalista hyödynnetyn hukkalämmön. DCNE lasketaan kaavalla (4.8). [50, s. 21-22]

$$DCNE = \frac{1}{ERE} = \frac{E_{it}}{E_{tot} - E_{re}} \quad (4.8)$$

#### 4.3.3 CADE eli Corporate Average Data Center Efficiency

CADE-arvo on konsulttiyritys McKinsey & Companyn ja Uptime Instituten vuonna 2008 esittelemä energiatehokkuuden mittari, joka ottaa huomioon myös

infrastruktuurin ja tietotekniikan käyttöasteen. CADE ei kuitenkaan huomioi energiatehokkuutta mitatessaan hukkalämmön hyödyntämistä.

CADE lasketaan kaavalla (4.9) ja lopputulokseksi saadaan prosenttiluku.

$$CADE = AU_{fac} * EE_{fac} * AU_{it} * EE_{it} \quad (4.9)$$

$AU_{fac}$  = tietokonesalin infrastruktuurin käyttöaste eli tietokonesalin tietotekniikkalaitteiston kuormituksen ja tietokonesalin kapasiteetin suhde.

$EE_{fac}$  = tietokonesalin infrastruktuurin energiatehokkuus eli tietotekniikkalaitteiston sähkön kulutuksen ja tietokonesalin sähkön kokonaiskulutuksen suhde.

$AU_{it}$  = Tietotekniikkalaitteiston käyttöaste eli laitteistojen suorittimien keskimääräinen käyttöaste. Tietotekniikkalaitteiston käyttöaste perustuu usein arvioihin.

$EE_{it}$  = Tietotekniikkalaitteiston energiatehokkuus eli kuinka tehokkaasti tietotekniikkalaitteisto käyttää energian palveluiden tuotannossa.

Konesalit luokitellaan saadun CADE-arvon perusteella CADE-tasolle 1-5, joista suurempi taso merkitsee parempaa energiatehokkuutta. [2, s. 19]

**Taulukko 3. CADE -arvojen luokittelu**

Arvo (%)	Taso
<5	1
5-10	2
10-20	3
20-40	4
>40	5

CADE-arvo ja sen muodostuminen on esitetty yksityiskohtaisemmin lähteessä [51]

#### 4.3.4 Energiatiheys

Energiatiheys on tietokonesalin kuluttaman sähkötehon ja tietokonesalin pinta-alan suhdeluku, joka on normaalisti 0,5-1 kW/m<sup>2</sup> suuruusluokkaa, mutta tehokkailla palvelinkaapeilla energiatiheys voi olla yli 5 kW/m<sup>2</sup>. Energiatiheys ei varsinaisesti kuvaa tietokonesalin tietotekniikkalaitteiston tai talotekniikan energiatehokkuutta, vaan se ilmaisee kuinka tiiviisti ja kuinka tehokkailla palvelimilla tietokonesali on täytetty.

Energiatiheys  $E_d$  lasketaan kaavalla (4.10) [2, s. 18]

$$E_d = \frac{E_{it}}{A} \quad (4.10)$$

$E_{it}$  = tietokonesalin tietotekniikkalaitteiston energiankulutus

$A$  = tietokonesalin pinta-ala

#### 4.3.5 CUPS eli Computer Units per Second

CUPS -arvo on tietotekniikkalaitteiston normitettu laskentateho jaettuna sähköteholla. CUPS-arvon yksikkönä on CUPS/W. Normitettu laskentateho määritellään laitteiden valmistusvuoden perusteella kaavalla (4.11). [2, s.19]

$$CUPS = \frac{\sum (a * n * AU_{it})}{E_{tot}} \quad (4.11)$$

$a$  = valmistusvuoden perusteella määritelty taulukon mukainen arvo laitteelle

$n$  = valmistusvuoden laitteiden lukumäärä

$AU_{it}$  = valmistusvuoden laitteiden käyttöaste

$E_{tot}$  = tietokonesalin kokonaisenergiankulutus

## 5 Diplomityön menetelmät ja käytettävät ohjelmistot

### 5.1 Optimointi

Optimoinnilla tarkoitetaan parhaan ratkaisun etsimistä määritellyn kohdefunktion ratkaisujen joukosta. Kohdefunktion avulla määritellään optimoinnin tavoite, eli mitä arvoa tai arvoja optimoidaan. Optimoinnin tavoitteita voi olla enemmän kuin yksi ja tavoitteet voivat olla ristiriidassa keskenään. Optimointia, jossa tavoitteita on enemmän kuin yksi kutsutaan monitavoiteoptimoinniksi. Optimoinnin muuttujia sitovat rajoitusehdot, joiden avulla määrittään mallin käypien ratkaisujen joukko. [52 s. 3-6, 25]

Tässä työssä optimoinnin tarkoituksena on löytää mallin mahdollisimman energia- ja kustannustehokas ratkaisu tietokonesalin hukkalämmön hyödyntämiseen. Tämä ratkaisu löytyy minimoimalla järjestelmän elinkaarikustannuksia, eli kyseessä on yksitavoiteoptimointi.

### 5.2 Talouslaskenta

Tässä työssä lasketaan tietokonesalin LVII-järjestelmän elinkaarikustannuksia tarkastelujaksolla. Elinkaarikustannusten laskentaan käytetään nykyarvomenetelmää, jossa kaikki järjestelmän kulut, tuotot ja investoinnit diskontataan nykyhetkeen ja lasketaan yhteen. Työssä ei huomioida varsinaisesta liiketoiminnasta saatuja tuloja, joten nykyarvolause on esitetty kustannusmuodossa, jolloin vaihtoehtoisten järjestelmien vertailussa pienimmät elinkaarikustannukset ovat edullisin vaihtoehto. Nykyarvomenetelmää  $n$  vuoden pituiselle tarkastelujaksolle voidaan kuvata yleisesti lausekkeella:

$$LCC = -\sum_{k=1}^n \frac{T_k}{(1+i)^k} + \sum_{k=1}^n \frac{K_k}{(1+i)^k} + I_0 - \frac{S}{(1+i)^n}, \quad (5.1)$$



missä LCC on elinkaarikustannukset,  $T_k$  on vuoden  $k$  tuotot,  $K_k$  vuoden  $k$  kulut,  $I_0$  alkuinvestointi vuoden 0 alussa,  $S$  jäännösarvo vuoden  $n$  lopussa ja  $i$  on laskennassa käytetty korkotekijä. [53, s. 12]

Nykyarvomenetelmän lauseke voidaan kirjoittaa myös samansuuruisille, vuosittaisille kuluille ja tuotoille käyttäen diskonttaustekijöitä. Tällöin lauseke saa muodon

$$LCC = -a_{nT}T + a_{nK}K + I_0 - \frac{S}{(1+i)^n} \quad (5.2)$$

missä  $P$  on elinkaarikustannukset,  $a_{nT}$  on samansuuruisen tuottojen diskonttaustekijä  $n$  vuoden pituiselle tarkastelujaksolle,  $a_{nK}$  samansuuruisen kulujen diskonttaustekijä  $n$  vuoden pituiselle tarkastelujaksolle,  $T$  vuosittaiset tuotot,  $K$  vuosittaiset kulut,  $I_0$  alkuinvestointi vuoden 0 alussa,  $S$  jäännösarvo vuoden  $n$  lopussa ja  $i$  on laskennassa käytetty korkotekijä. [53, s. 12]

Inflaation huomioiva nykyarvotekijä  $a'$  lasketaan kaavalla

$$a' = \frac{1 - \left(1 + \left(\frac{i-f}{1+f}\right)\right)^{-n}}{\left(\frac{i-f}{1+f}\right)} \quad (5.3)$$

,jossa  $i$  on nimelliskorko,  $f$  inflaatio ja  $n$  tarkastelujakson pituus vuosina.

Inflaation ja eskalaation huomioiva nykyarvotekijä  $a''$  lasketaan kaavalla

$$a'' = \frac{1 - \left(1 + \frac{\left(\frac{i-f}{1+f}\right) - e}{1+e}\right)^{-n}}{\frac{\left(\frac{i-f}{1+f}\right) - e}{1+e}} \quad (5.4)$$

jossa  $e$  on energiamuodon hinnan eskalaatio, joka voi olla positiivinen, jolloin energian hinnan nousu on yleistä inflaatiota suurempi, tai negatiivinen, jolloin energian hinta kasvaa hitaammin kuin yleinen hintataso.

### 5.3 IDA ICE

Diplomityön esimerkkikohde mallinnetaan käyttämällä IDA ICE -ohjelmistoa.

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) on ruotsalaisen EQUA Simulations Oy: n kehittämä simulointityökalu, jonka avulla voidaan mallintaa ja simuloida rakennuksia ja rakennusteknisiä järjestelmiä. Ohjelmisto sisältää monipuoliset työkalut rakennusten lämpödynaamiseen laskentaan ja energiankulutuksen sekä sisäilmaston tutkimiseen.

Ohjelman simulointi tapahtuu dynaamisesti käyttäen hyväksi koko vuoden säädataa. Paikkakuntakohtaisia olosuhdetietoja sisältävien lokalisaatiopakettien avulla rakennuksen energiankulutusta voidaan simuloida todellisuutta vastaavissa olosuhteissa. Sen lisäksi lokalisaatiot sisältävät paikalliset rakentamismääräykset jotka ovat ladattavissa sen tietokannasta.

Ohjelma suorittaa samanaikaisesti laskelmia rakennuksen eri ominaisuuksista huomioiden rakennuksen muodon, vaipan ominaisuudet, LVI- järjestelmät, ohjaukset, ikkunat, valaistuksen, lämpöviihtyvyyden, sisäilman laadun ja energiankulutuksen. Ohjelman avulla voidaan tutkia rakennuksen ja vyöhykkeiden energiankulutusta, energiavirtoja ja sisäilmasto-olosuhteita.

Yksityiskohtaiset tulokset saadaan mallista vyöhykekohtaisesti. Simuloinnin avulla saadaan selvitettyä kohteen vyöhykekohtainen lämmitysenergiankulutus, jäähdytysenergiankulutus, lämpimän käyttöveden energiankulutus, ostoenergiankulutus, LVI-järjestelmien sähkönkulutus, sähköjärjestelmien kulutus ja veden kulutus. Simulointitulosten avulla voidaan vertailla erilaisten suunnitteluvaihtoehtojen tai parametrien vaikutuksia kohteen energiankulutukseen, olosuhteisiin ja toimintaan. Mallin perusteella rakennusten energiankulutusta voidaan analysoida varsin hyvällä tarkkuudella, mikäli rakennus ja järjestelmät ovat mallinnettu yksityiskohtaisesti ja tarkasti. [54, s. 1-2]

IDA ICEn käyttöliittymä on jaettu kolmeen eri tasoon, joissa käyttäjällä on eri mahdollisuuksia järjestelmän muokkauksen ja simuloinnin laajuuden ja tarkkuuden suhteen. [55, s. 9]

## 5.4 MOBO

Diplomityön optimointi tehdään MOBO-ohjelman avulla.

MOBO on rakennusten optimointiin tarkoitettu ilmaisohjelma, jota voidaan käyttää yhdessä IDA ICEn kanssa. MOBOn avulla voidaan optimoida yhden tai useamman tavoitteen optimointiongelmia jatkuvien sekä epäjatkovien muuttujien ja kohdefunktioiden avulla. MOBOn algoritmikirjastosta löytyy erilaisia optimointialgoritmeja (Kuva 18), joiden avulla kohdefunktioiden minimiä voidaan etsiä.

Ohjelman avulla on mahdollista suorittaa useita samanaikaisia rinnakkaisia optimointeja, mikä nopeuttaa optimoinnin läpiviemistä. Optimointiongelma määritellään syöttämällä ja määrittelemällä muuttujat ja kohdefunktiot ohjelman graafiseen käyttöliittymään. Optimoinnin tulokset tulostuvat ohjelmasta taulukkomuodossa, josta ne on helppo siirtää jatkokäsittelyä varten esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmaan. Ohjelmalla voi myös piirtää kahden funktion kuvaajan sekä useamman muuttujan kuvaajan havainnollistamaan tuloksia. [56, s. 1-6]

Algorithm	PROBLEM				Automatic Constraint handling	VARIABLES		
	Single	Multi-	Constrained	Multi- modal		Discrete	Continuous	Parallel Computing
Binary NSGA-II	X	X	X		X	X	X	X
BINARY Pareto Archive NSGA-II	X	X	X		X	X	X	X
Binary OMNI-Optimizer	X	X	X	X	X	X	X	X
Real Coded NSGA-II	X	X	X		X		X	X
Real Coded Pareto Archive NSGA-II	X	X	X		X		X	X
Real Coded OMNI-Optimizer	X	X	X	X	X		X	X
Hooke-Jeeves	X		X		X		X	
Hybrid Algorithm	X		X		X	X	X	X
Brute-Force	X	X	X	X		X	X	X
Random Search	X	X	X	X		X	X	X

Kuva 18. MOBOn optimointialgoritmien ominaisuudet [56]

## 5.5 Optimointiongelmat

Tässä työssä etsitään konesalitoimijan kannalta elinkaarikustannuksiltaan edullisinta ratkaisua, joka täyttää tietokonesalin olosuhteille asetetut vaatimukset sekä määritellyt reunaehdot.

Optimointiongelma voidaan määritellä kustannusfunktion avulla:

$$\text{Min} \left\{ F(x) = a''_e \epsilon_e (Q_{IT} + Q_{cool} + Q_{dc\_hvac} + Q_{dc\_l} + Q_{dc\_e}) - a''_h (\epsilon_{re} Q_{re}) + a' I_m + I_{cool} \right\} \quad (5.5)$$

jossa  $a''_e$  on sähköenergian eskaloitu nykyarvotekijä,  $\epsilon_e$  sähköenergian hinta,  $Q_{IT}$  palvelimien energiankulutus vuodessa,  $Q_{cool}$  tietokonesalin jäähdytyksen tuotannon sähköenergiankulutus vuodessa,  $Q_{dc\_hvac}$  tietokonesalin muiden lvi-laitteiden (pumppujen ja CRAHien) sähköenergiankulutus vuodessa,  $Q_{dc\_l}$  tietokonesalin valaistuksen energiankulutus vuodessa,  $Q_{dc\_e}$  tietokonesalin muu sähköenergian kulutus vuodessa (UPS-laitteet ja virranjakelu- sekä muuntajahäviöt)  $a''_h$  kaukolämmön eskaloitu nykyarvotekijä,  $\epsilon_{re}$  energiayhtiölle myytävän kaukolämmön hinta,  $Q_{re}$  energiayhtiölle myytävän kaukolämmön määrä vuodessa,  $a'$  inflaation huomioiva nykyarvotekijä,  $I_m$  vuosittaiset huoltokustannukset ja  $I_{cool}$  tietokonesalin jäähdytys- ja LTO-järjestelmään kuuluvien LVI-laitteiden investointikustannus.

Rajoitusehdot:

$$H_1(x) = T_{ca} \geq T_{cws} + 3 \quad (5.6)$$

$$H_2(x) = T_{ha} - T_{ca} \leq 15 \quad (5.7)$$

$$x = (T_{ca}, T_{ha}, T_{cws}, \Delta T_{cw})^T \quad (5.8)$$

$$R_0(T_{ca}) = [16 \text{ } ^\circ\text{C}, 26 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (5.9)$$

$$R_0(T_{ha}) = [30 \text{ } ^\circ\text{C}, 40 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (5.10)$$

$$R_0(T_{cws}) = [7\text{ }^{\circ}\text{C}, 22\text{ }^{\circ}\text{C}] \quad (5.11)$$

$$R_0(\Delta T_{cw}) = [5\text{ }^{\circ}\text{C}, 10\text{ }^{\circ}\text{C}] \quad (5.12)$$

, jossa  $T_{ca}$  on kylmäkäytävän lämpötila,  $T_{ha}$  kuumakäytävän lämpötila,  $T_{cws}$  jäähdytyksen menoveden lämpötila,  $\Delta T_{cw}$  jäähdytyksen paluu- ja menoveden lämpötilaero.

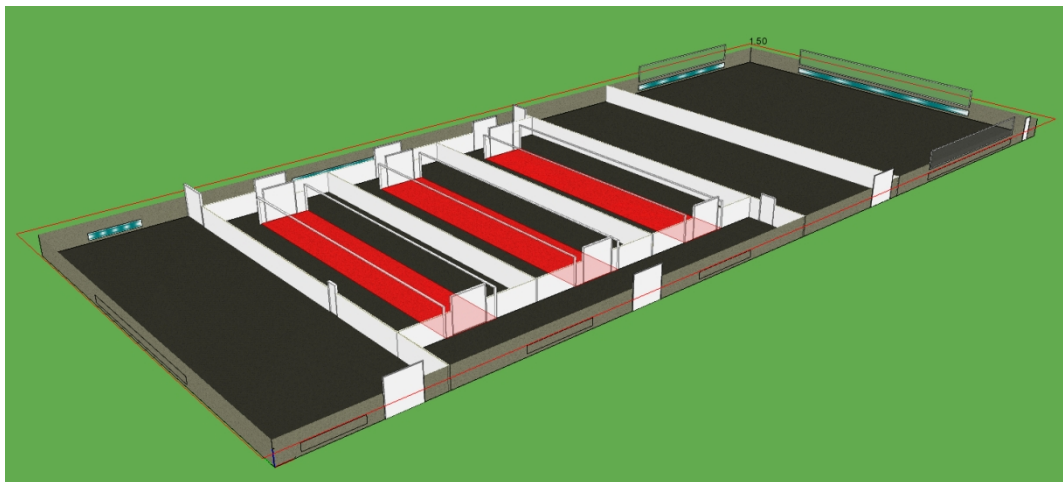
Tässä diplomityössä optimointi suoritettiin MOBO-ohjelmiston avulla Brute force -metodilla, jolloin optimointi käy läpi kaikki mahdolliset vaihtoehdot määritetyillä parametrien askeleilla. Brute force ei ole älykäs algoritmi ja sen avulla tehtävä optimointi on hidasta, mikäli vaihtoehtoja on paljon. Tässä työssä sitä päätettiin käyttää, jotta eri muuttujien vaikutukset elinkaarikustannuksiin ja energiatehokkuuden mittareihin olisi nähtävissä selkeästi ja eriteltävissä.

## 6 Esimerkkikohde ja mallintaminen

Tässä työssä mallinnetaan esimerkkikohde, jossa tietokonesali ja sen tekniset tilat on sijoitettu olemassa olevaan rakennukseen, jonka muut alueet ovat toimistokäytössä.

Helsinkiin sijoitetun kaksikerroksisen esimerkkikohteen pinta-ala on 4200 m<sup>2</sup>. Kohteen 1. kerroksessa sijaitsee tietokonesali, jonka tietotekniikkalaitteiden yhteenlaskettu jatkuva sähköteho on 3 MW. Tietokonesali on jaettu kolmeen vyöhykkeeseen, joiden kunkin laiteho on 1 MW. Jokainen vyöhyke on jaettu kylmä-kuumakäytävä -periaatteen mukaisesti kahteen kylmäkäytävään ja näiden välissä sijaitsemaan kuumakäytävään (HACS). Kunkin kuumakäytävävyöhykkeen ala on 78 m<sup>2</sup> ja sitä vastaavan kylmäkäytävävyöhykkeen 152,7 m<sup>2</sup>. Kylmä- ja kuumakäytäviä reunustavat huoltokäytävät kummassakin käytävän päässä.

Kohteen 1. kerroksessa sijaitsevat myös tietokonesalin LVI- ja sähköjärjestelmien tarvitsemat tekniset tilat. Samassa rakennuksessa muut alueet ovat toimistotilaa. 1. kerroksessa toimistoa on 600 m<sup>2</sup> ja toisessa kerroksessa koko kerrosala 2100 m<sup>2</sup> on toimistoa. 1. kerroksen kerroskorkeus on 4,3 m ja 2. kerroksen 3,0 m. Mallin katto on tasakattoinen ja mallin rakenteet ovat IDA ICE -mallipohjan ”FinD32012 Toimistorakennus” mukaiset. Tietokonesalin kuuma- ja kylmäkäytävien seininä on käytetty eristettyä sisäseinää. Mallin ikkunat on mallinnettu seinäkohtaisesti yhtenä leveänä ikkunana mallin laskennan keventämiseksi.



Kuva 19. Mallinnetun kohteen 1. kerros.

Kohteessa on vesikiertoinen radiaattorilämmitysverkosto ja jäähdytysverkosto. Radiaattorit on mallinnettu ikkunoiden tapaan seinäkohtaisesti yhdellä radiaattorilla laskennan nopeuttamiseksi. Rakennus on kaukolämmitetty. Toimistojen tarvitsema jäähdytys tuotetaan vedenjäähdytyskoneella, jonka COP = 4 (vakio) ja niiden jäähdytys on eriytetty tietokonesalin jäähdytysjärjestelmästä. Tietokonesalin LVI- ja UPS-järjestelmien tarvitsemat tekniset tilat on liitetty samaan jäähdytysjärjestelmään toimistotilojen kanssa, mutta mittaroitu erikseen.

Kaikkien tilojen valaistuksen on oletettu olevan teholtaan 12W/m<sup>2</sup> ja päällä arkisin klo 7-18 ja viikonloppuisin pois päältä.

LVIA-järjestelmien mallintaminen tehdään IDA ICEssa mallikirjaston avulla. Mallikirjaston komponentit eivät ole valmistajien todellisia tuotteita, vaan malleja, joiden parametrit ovat käyttäjän muokattavissa ja asetettavissa.

Järjestelmän osien, kuten tulo- ja poistoilmalaitteiden tai jäähdytyslaitteiden, sijoitukseen huonetiloissa ei voi vaikuttaa, vaan ilmanvaihto ja jäähdytys kohdistuvat huonetilaan yleisesti. Jotta ilman kierto vastaisi paremmin todellista tilannetta, on simuloituun malliin luotu kuumakäytävät ja niitä ympäröivät kylmäkäytävät siten, että viileä tuloilma tuodaan kylmäkäytävälle ja lämmin poistoilma poistetaan kuumakäytävältä. Näiden välinen ilman siirtyminen on mallinnettu koko seinän levyisellä ovettomalla oviaukolla.

IDA ICEssa ei ole mahdollista tehdä huonetta huoneen sisälle. Huone huoneen sisällä on kuitenkin usein käytetty ratkaisu tietokonesaleissa kuumakäytäväperiaatteen toteuttamiseksi. IDA ICElla ei voida myöskään simuloida tarkemmin mallia, jossa käytettäisi korotettua lattiaa ilman jakamiseen. Korotettu lattia on myös usein tietokonesaleissa käytetty ratkaisu, sillä se mahdollistaa ilman jakamisen suoraan palvelinrakkien viereen asennuslattian säleikköjen kautta.

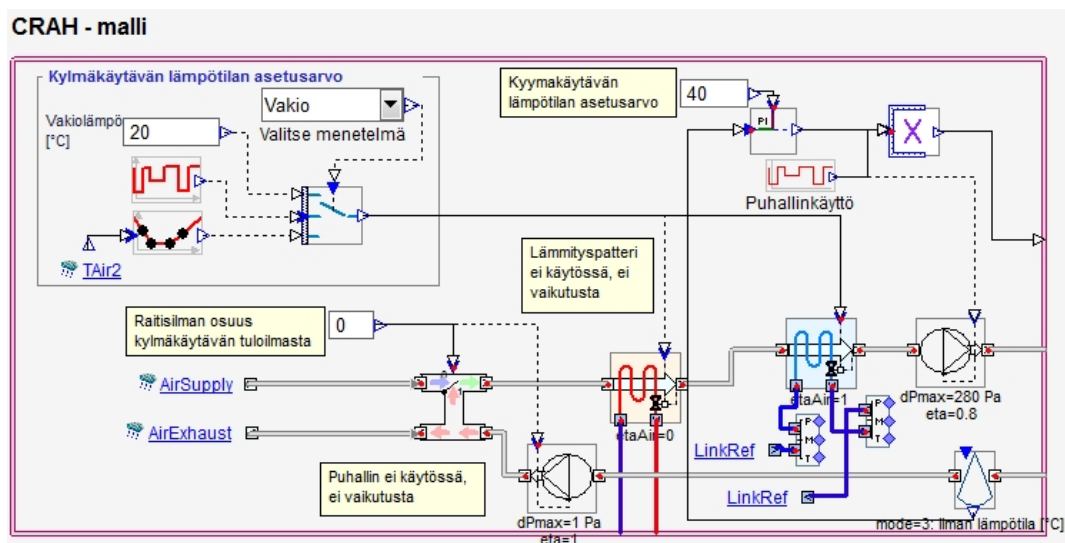
Tässä työssä mallinnetaan referenssikohde sekä optimoitavia vaihtoehtoja, joissa hukkalämpöä hyödynnetään lämpöpumpun avulla kaukolämpöverkkoon. Eri vaihtoehdot on esitelty kappaleissa 6.1 ja 6.2. Kaikissa simuloituissa

vaihtoehtoissa tietokonesalin jäähdytyksen jako mallinnetaan CRAHien avulla, sillä se on yleisin tapa toteuttaa uuden konesalin jäähdytys.

Optimoituja malleja verrataan ominaisuuksiltaan ja asetusarvoiltaan vastaavaan vertailutapaukseen, jossa ei ole lämpöpumpulla tuotettua hukkalämmön hyödyntämistä, vaan tietokonesalin jäähdytys on toteutettu CRAHien, vedenjäähdytyskoneiden ja lauhduttimien avulla.

IDA ICEn mallikirjastosta ei löydy erikseen vakioilmastointikoneita, joten CRAH on mallinnettu yhtenä ilmaa kierrättävänä ilmanvaihtokoneena, joka ottaa lämpimän ilman kuumakäytäviltä, jäähdyttää sen jäähdytyspatterilla asetusarvoon ja palauttaa viileän ilman kylmäkäytäville. Mallin konesalilohkot ovat keskenään muodoiltaan, ominaisuuksiltaan ja olosuhteiltaan identtiset, joten mallissa yksi CRAH palvelee kaikkia kylmä- ja kuumakäytäviä, vaikka todellisuudessa kutakin konesalilohkoa palvelisi useampi CRAH.

CRAHin puhaltimen nopeus säätyy annettujen kylmä- ja kuumakäytävän lämpötilojen asetusarvojen mukaisesti (Kuva 20). Puhaltimelle on annettu parametrit, joilla sen suoritusarvot vastaavat CRAH laitetoimittajien laskentaohjelmista saatuja teknisiä arvoja. CRAHiin on jätetty ohjelmiston kuvaustiedoston toiminnan takia myös toinen puhallin ja lämmityspatteri, jotka eivät ole käytössä eivätkä vaikuta mallin toimintaan.

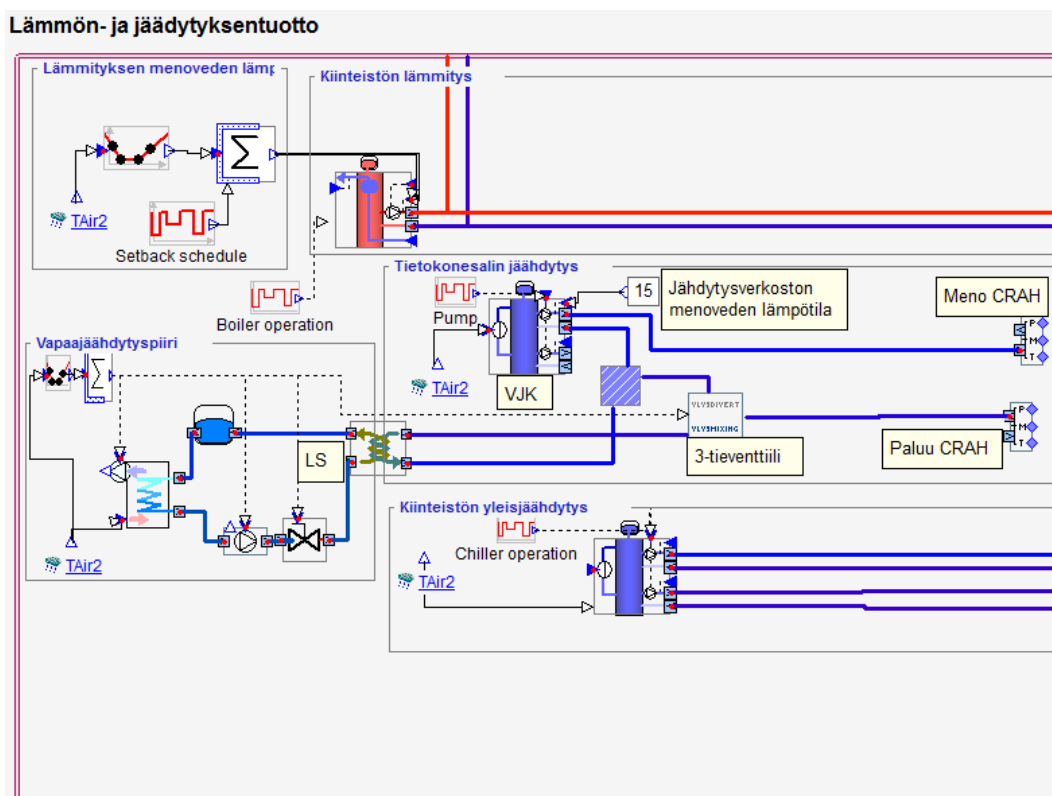


Kuva 20. Tietokonesalin CRAH-malli



## 6.1 Vapaajäähdytys + CRAH, ei hukkalämmön hyödyntämistä

**Vaihtoehto 1: VJK, referenssi:** Kohteessa on kompressorikäyttöiset vedenjäähdytyskoneet, lauhduttimet, CRAHit ja mahdollisuus vapaajäähdtykseen. Vapaajäähdtystä käytetään, kun ulkoilman lämpötila on riittävän alhainen. Kun vapaajäähdtystä ei ole käytettävissä, käytetään kompressorikäyttöistä vedenjäähdytyskonetta ja nestejäähdytintä. Kohteessa voidaan käyttää myös osittaista vapaajäähdtystä, kun vapaajäähdtyksellä ei saada katettua koko jäähdytystarvetta. Tällöin käytetään sekä vapaajäähdtystä, että koneellista jäähdytystä. Vaihtoehtoa 1 ei ole optimoitu, vaan malliin on valittu energiatehokkaalle vedenjäähdytyskoneella jäähdytetylle tietokonesalille tyypilliset suunnitteluarvot.

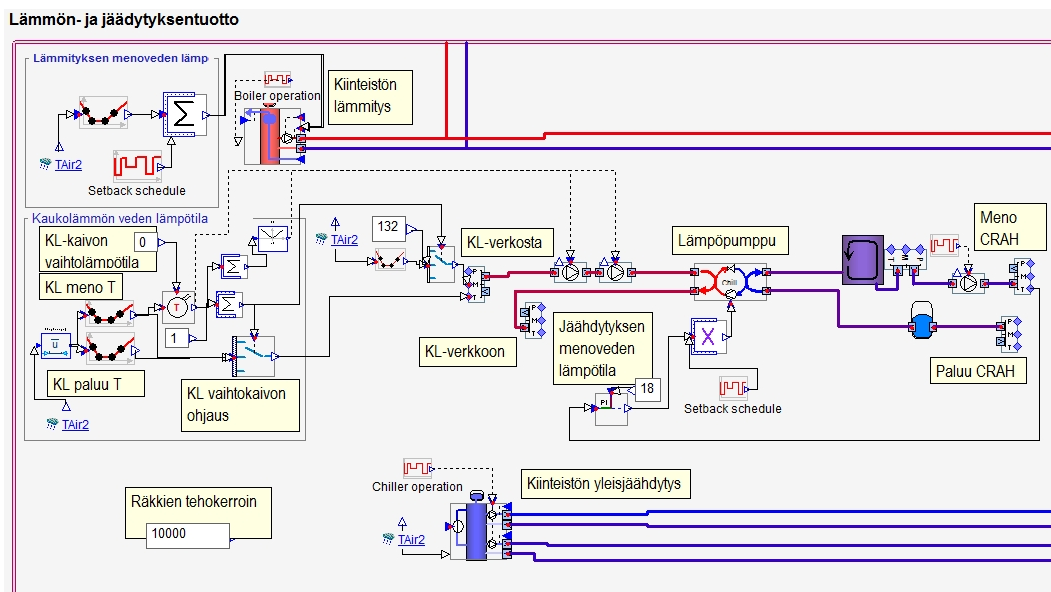


Kuva 21. Vaihtoehto 1, VJK -jäähdytysjärjestelmän malli IDA ICEssa

## 6.2 Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpun avulla kaukolämpöverkkoon

Tietokonesalin jäähdytys tuotetaan lämpöpumppujen avulla. Tietokonesalista palaava vesi jäähdytetään lämpöpumppujen avulla asetusarvoon ja jäähdytysveteen sitoutunut lämpöenergia siirretään energiayhtiön kaukolämpöverkkoon. Lämpö voidaan syöttää joko kaukolämpöverkon paluupuolelle tai menopuolelle riippuen lämpöpumpun tuottamasta lämpötilasta sekä kaukolämpöverkon meno- ja paluupuolen vallitsevista lämpötiloista.

Lämpöpumppu on mallinnettu malliin yhtenä kappaleena mallin keventämiseksi ja mallinnan helpottamiseksi. Oikeassa tilanteessa 3 MW tietokonesali toteutettaisiin useammalla rinnakkaisella lämpöpumpulla. Vastaava yksinkertaistus on tehty jäähdytyspiirien pumpuille.

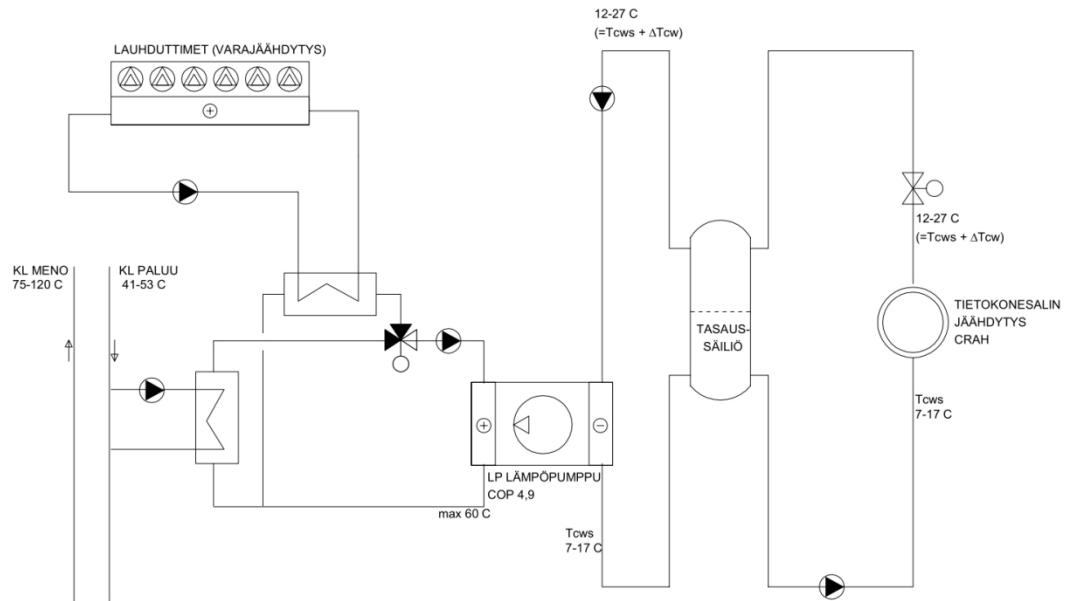


Kuva 22. Lämpöpumpullisen jäähdytysjärjestelmän (vaihtoehdot 2-5) malli IDA ICE -ohjelmassa

### 6.2.1 Hyödynnettävä hukkalämpö myydään energiayhtiölle

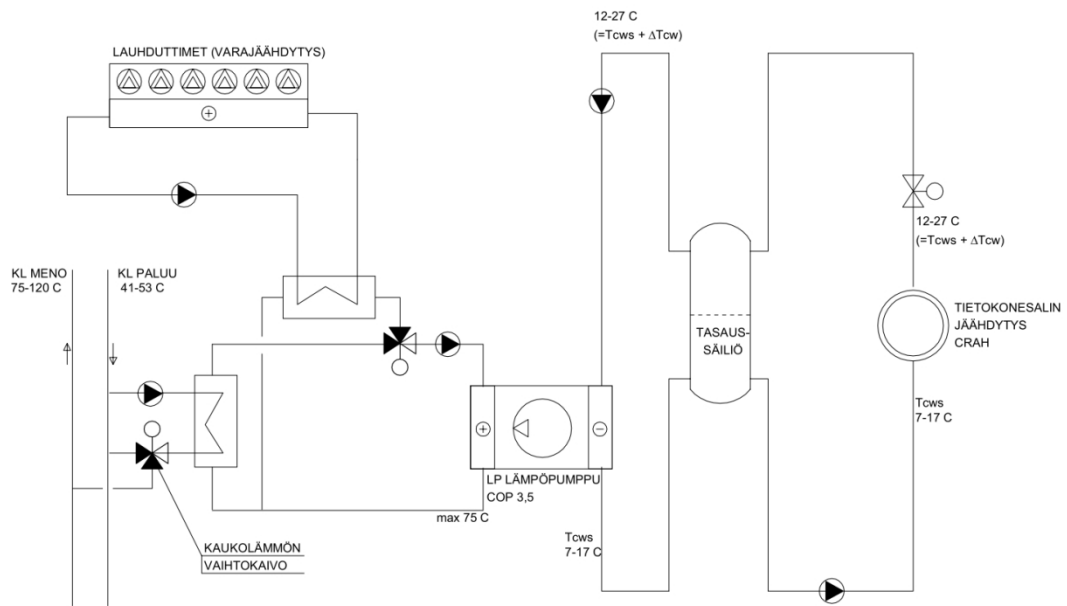
Konesalitoimija vastaa tietokonesalin jäähdytyslaitteistojen hankinnasta, ylläpidosta ja energiakuluista. Kaukolämpöverkkoon syötetyn energian määrä mittaroidaan ja energiayhtiö maksaa lämpöenergiasta sopimuksen mukaista hintaa.

**Vaihtoehto 2, LP 60:** Lämpöpumpulla voidaan tuottaa maksimissaan 60 °C lämpöä, jolloin hukkalämmöstä saatava energia siirretään aina kaukolämmön paluupuolelle. Käytettävän lämpöpumpun COP on 4,9, kun tuotettava lämpötila on 60 °C ja jäähdytysverkoston lämpötila ennen lämpöpumppua on 20 °C ja lämpöpumpun jälkeen 15 °C.



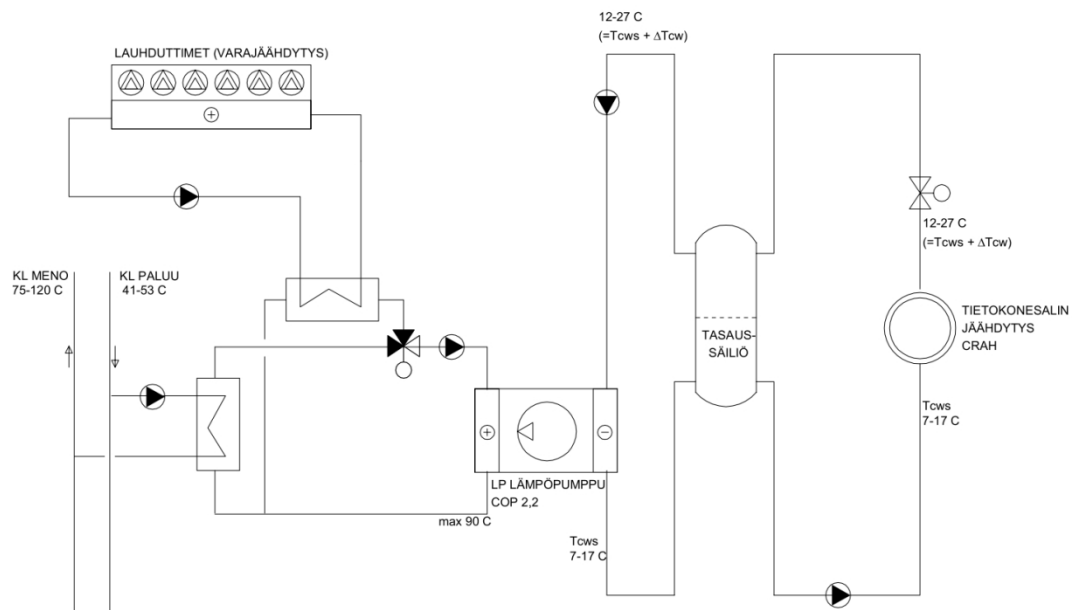
Kuva 23. Vaihtoehto 2, LP 60 periaatekaavio

**Vaihtoehto 3, LP 75:** Lämpöpumpulla voidaan tuottaa maksimissaan 75 °C lämpöä. Hukkalämmöstä saatava energia siirretään kaukolämmön paluupuolelle, kun kaukolämpöverkon menolämpötila on maksimissaan 75 °C. Tämä toteutuu, kun ulkolämpötila on 5 °C tai lämpimämpi (Kuva 28). Jos kaukolämpöverkon menopuolen lämpötila on yli 75 °C, siirretään saatava lämpö kaukolämpöverkon paluupuolelle. Käytettävän lämpöpumpun COP on 3,5 tilanteessa, jossa tuotettava lämpötila on 75 °C ja jäähdytysverkoston lämpötila ennen lämpöpumppua on 20 °C ja lämpöpumpun jälkeen 15 °C.



Kuva 24. Vaihtoehto 3, LP 75 periaatekaavio

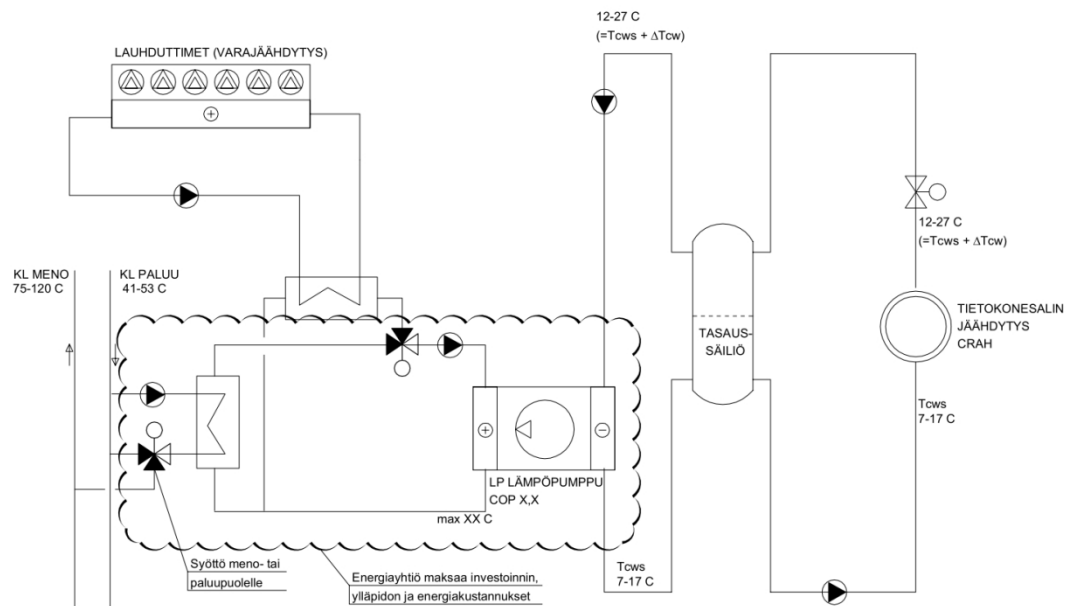
**Vaihtoehto 4, LP 90:** Lämpöpumpulla voidaan tuottaa maksimissaan 90 °C lämpöä. Hukkalämmöstä saatava energia siirretään aina kaukolämmön menopuolelle. Kaukolämpöverkon paluupuolelta otettava vesi lämmitetään lämpöpumpulla kaukolämpöverkon säätökäyrän mukaiseen menopuolen lämpötilaan ja vesi palautetaan menopuolelle. Mikäli menopuolen lämpötila on yli 90 °C, syötetään paluupuolelta otettu vesi menopuolelle 90 °C lämpötilassa, sillä tämä ei laske kaukolämpöverkon menopuolen lämpötilaa merkittävästi. Käytettävän lämpöpumpun COP on 2,2 tilanteessa, jossa tuotettava lämpötila on 90 °C ja jäähdytysverkoston lämpötila ennen lämpöpumppua on 20 °C ja lämpöpumpun jälkeen 15 °C.



Kuva 25. Vaihtoehto 4, LP 90 periaatekaavio

## 6.2.2 Energiayhtiö kustantaa lämpöpumppujen investoinnin ja ylläpidon

**Vaihtoehto 5, LP Ene:** Energiayhtiö hankkii lämpöpumppujärjestelmän, sisältäen varalle nestejäähdyttimet ja lämmönsiirtimet, näiden pumput sekä putkistot ja putkistovarusteet. Energiayhtiö maksaa mainittujen järjestelmäosien investointikulut ja huoltokustannukset sekä niiden kuluttaman sähköenergian. Tällöin energiayhtiö hoitaa konesalin jäähdytyksen, mutta ei maksa asiakkaalle erikseen hyödynnettävän lämpöenergian määrän mukaan. Konesalitoimija maksaa jäähdytysjärjestelmän lämpöpumpulta konesaliin ja tarjoaa hukkalämmön energiayhtiön hyödynnettäväksi.



Kuva 26. Vaihtoehto 5, LP Ene periaatekaavio

## 6.3 Lähtötiedot ja oletukset

### 6.3.1 Talouslaskennan lähtötiedot

Tarkastelujakson pituus  $n = 20$  vuotta, joka on lähteen [9, s. 14-15] mukainen tietokonesalien jäähdytysjärjestelmän tyypillinen käyttöikä.

Järjestelmän jäännösarvo tarkastelujakson lopussa on nolla.

Nimelliskorko  $i = 0,07 = 7 \%$

Inflaatio  $f = 0,02 = 2 \%$  (keskiarvo inflaatiosta Suomessa 2010-2015) [57]

Sähkön eskalaatio  $e_e = 0,02 = 2 \%$ . [58, s. 22]

Kaukolämmön eskalaatio  $e_h = 0,02 = 2 \%$  [58, s. 23-26].

Sähkön ja kaukolämmön hinnan on oletettu kasvavan Työ- ja elinkeinoministeriön ja Energiateollisuus ry:n Kaukolämmön asema Suomen energiajärjestelmässä tulevaisuudessa -loppuraportin skenaario 2 mukaisesti [58].

Tällöin inflaation huomioivaksi nykyarvotekijäksi saadaan kaavalla (5.3)

$$a' = \frac{1 - \left(1 + \left(\frac{0,07 - 0,02}{1 + 0,02}\right)\right)^{-20}}{\left(\frac{0,07 - 0,02}{1 + 0,02}\right)} = 12,57$$

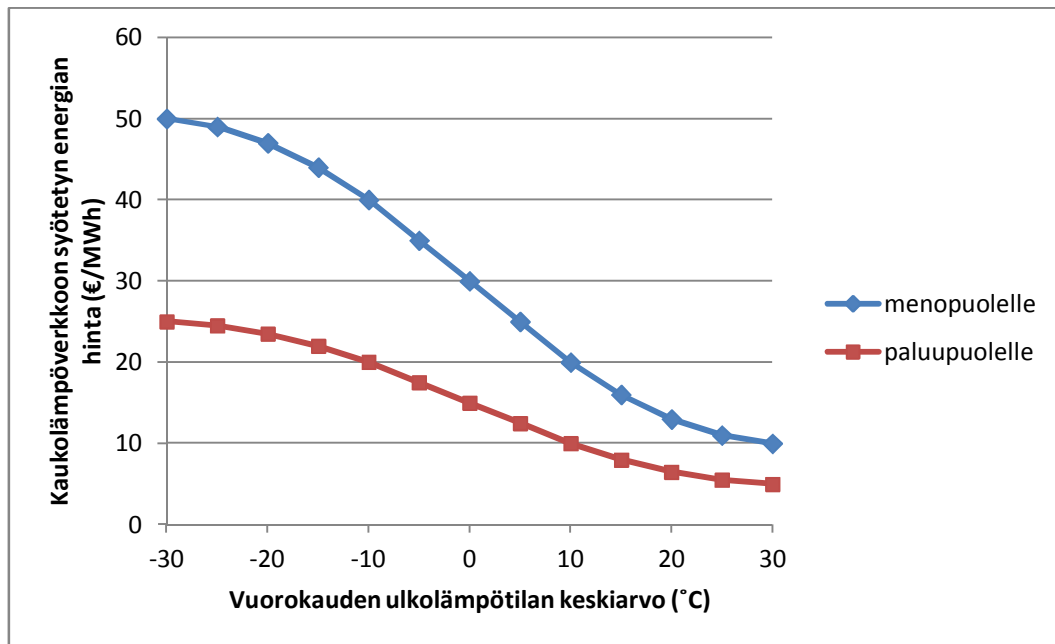
Ja inflaation ja eskalaation huomioivaksi nykyarvotekijäksi energiakustannuksille saadaan kaavalla (5.4)

$$a''_e = a''_h = a'' = \frac{1 - \left(1 + \frac{\left(\frac{0,07 - 0,02}{1 + 0,02}\right) - 0,02}{1 + 0,02}\right)^{-20}}{\frac{\left(\frac{0,07 - 0,02}{1 + 0,02}\right) - 0,02}{1 + 0,02}} = 15,09$$

Sähkön hinta nykyhetkellä  $\epsilon_e = 67,3$  €/MWh. Hinta sisältää sähköenergian, siirtomaksun ja verot. Hintatietona on käytetty Tilastokeskuksen energian hintatilastoista saatua keskiarvoa vuoden 2015 tammikuu-toukokuu sähkön hinnasta. [59]

Kaukolämmön hinta nykyhetkellä  $\epsilon_h = 72,0$  €/MWh. Hintatietona on käytetty Tilastokeskuksen energian hintatilastoista saatua vuoden 2015 tammikuun hintaa. [59].

Kaukolämpöverkkoon syötetystä energiasta maksettava hinta  $\epsilon_{re}$  vaihtelee laskentamallissa dynaamisesti ulkoilman lämpötilan mukaisesti menopuolelle syötettäessä välillä 50-10 €/MWh ja paluupuolelle syötettäessä välillä 25-5 €/MWh kuvan 27 mukaisesti. Kaukolämpöverkkoon syötetyn energian hinnan oletetaan noudattavan samaa eskalaatiota kuin kaukolämmön hinnan.



Kuva 27. Kaukolämpöverkkoon syötetyn energian hinta suhteessa vuorokauden ulkolämpötilan keskiarvoon

Menopuolelle syötetyn kaukolämmön hinta on muodostettu energiayhtiöltä saatujen arvioitujen kuukausikohtaisen pääkaupunkiseudun kaukolämmön rajatuotantokustannusten ja Helsingin vuoden 2012 säädatan pohjalta. Paluupuolelle syötetystä energiasta maksettavaksi hinnaksi on arvioitu energiayhtiön kanssa 50 % menopuolelle syötetyn energian hinnasta, johtuen paluupuolelle syötetyn energian priimaustarpeesta. Täten mallin säädatan mukaan kuukausittainen ja vuosittainen keskiarvo meno- ja paluupuolelle syötetystä kaukolämmöstä on alla olevan taulukon mukainen (Taulukko 4).



**Taulukko 4. Kaukolämpöverkkoon syötetystä energiasta maksetun hinnan kuukausittainen ja vuosittainen keskiarvo.**

kuukausi	hinta menopuolelle (€/MWh)	hinta paluupuolelle (€/MWh)
tammikuu	40,2	20,1
helmikuu	40,4	20,2
maaliskuu	38,6	19,3
huhtikuu	27,0	13,5
toukokuu	19,2	9,6
kesäkuu	16,0	8,0
heinäkuu	13,8	7,0
elokuu	14,6	7,3
syyskuu	19,2	9,6
lokakuu	24,0	12,0
marraskuu	32,8	16,4
joulukuu	38,0	19,0
<b>koko vuosi</b>	<b>27,0</b>	<b>13,5</b>

### 6.3.1.1 Jäähdytysjärjestelmien kustannusarvio

Kaikissa vertailtavissa vaihtoehtoissa tietokonesalin jäähdytys toteutetaan CRAHien avulla. Kaikissa tapauksissa investointi sisältää myös lauhduttimet, lämmönsiirtimet, pumpput, putkiston ja putkistovarusteet sekä putkityöt. Jäähdytyksen tuotantotapa eroaa tapauksittain.

Alla olevan taulukon tapaukset on kuvattu tarkemmin luvussa 6.2 *Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpun avulla kaukolämpöverkkoon*. Vaihtoehto 1 VJK tarkoittaa vaihtoehtoa, jossa jäähdytys tuotetaan vedenjäähdytyskoneella ja hukkalämpöä ei hyödynnetä kaukolämpöverkkoon. Vaihtoehto 2 LP 60 °C tarkoittaa vaihtoehtoa, jossa jäähdytys tuotetaan lämpöpumpulla, jolla voidaan tuottaa 60 °C lauhdelämpöä kaukolämpöverkkoon (syöttö paluupuolelle). Vastaavasti Vaihtoehto 3 LP 75 °C tarkoittaa vaihtoehtoa, jossa jäähdytys tuotetaan lämpöpumpulla, jolla voidaan tuottaa 75 °C lauhdelämpöä kaukolämpöverkkoon (syöttö paluu- ja menopuolelle verkoston lämpötilan mukaan). Vaihtoehto 4, LP 90 °C taas tarkoittaa vaihtoehtoa, jossa jäähdytys tuotetaan lämpöpumpulla, jolla voidaan tuottaa 90 °C lauhdelämpöä kaukolämpöverkkoon (syöttö menopuolelle). Vaihtoehto 5 tapauksessa Energiayhtiö hankkii lämpöpumppujärjestelmän, ja maksaa sen investoinnin.

Taulukko 5. Jäähdytysjärjestelmien kustannusarviot 3 MW tietokonesalille (tuhatta euroa).

Komponentti	Vaihtoehtojen kustannukset (k€)				
	Vaihtoehto 1 VJK	Vaihtoehto 2 LP 60 °C	Vaihtoehto 3 LP 75 °C	Vaihtoehto 4 LP 90 °C	Vaihtoehto 5
Vedenjäähdytys-kone	480	-	-	-	-
Lämpöpumppu	-	750	900	1 300	-
CRAHit	600	600	600	600	600
Lauhduttimet	300	300	300	300	300
Lämmönsiirtimet	75	75	75	75	75
Putkisto ja varusteet	390	390	390	390	390
Pumput	150	150	150	150	150
Putkityöt	45	45	45	45	45
<b>Yhteensä</b>	<b>2 040</b>	<b>2 310</b>	<b>2 460</b>	<b>2 860</b>	<b>1 560</b>

Kustannusarviot perustuvat lämpöpumppujen osalta tietokonesalien lämpöpumppuratkaisuja toimittavan yrityksen kustannusarvioon ja muilta osin Granlundin konsulttien arvioon.

Järjestelmien investointikustannusten oletetaan pysyvän vakiona optimoitavista muuttujista riippumatta. Todellisuudessa arvojen muutos vaikuttaa jonkin verran CRAHien, pumppujen, putkiston ja putkistovarusteiden investointikustannuksiin.

LVI-järjestelmien vuotuisiksi huoltokustannuksiksi on arvioitu 2 % järjestelmän investointikustannuksesta.

### 6.3.2 Tekniset lähtötiedot ja oletukset

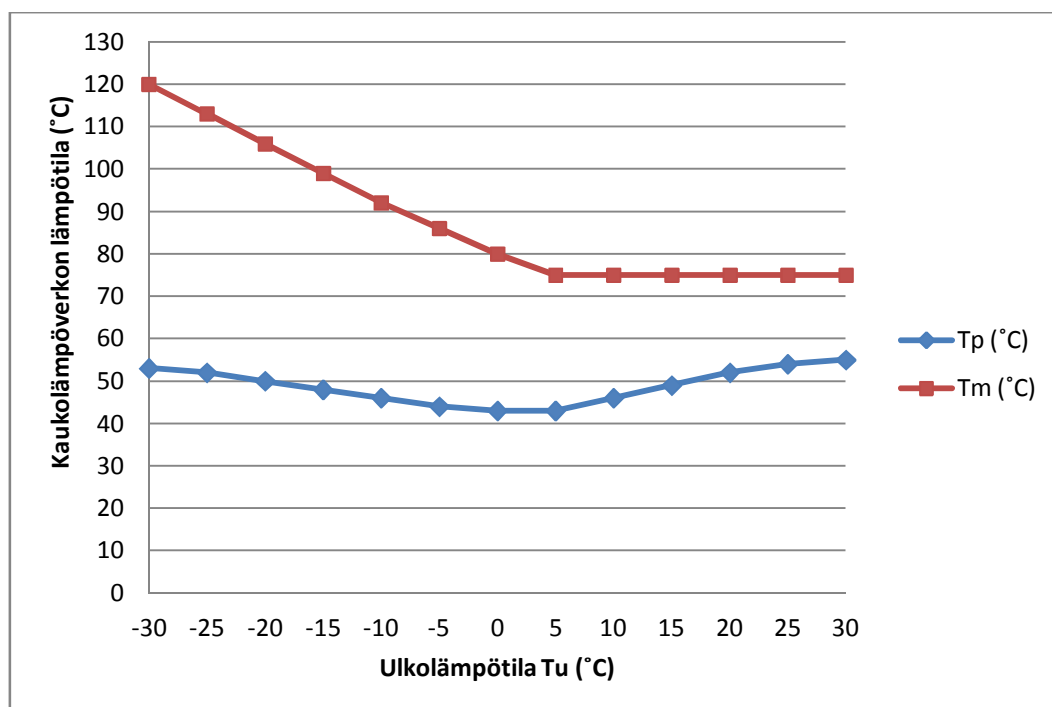
Pumppujen kokonaishyötysuhde  $\eta_p = 0,80$  Pumppujen hyötysuhde on mallissa vakio ja sisältää moottorin hyötysuhteen. Pumppujen hyötysuhde on määritetty laitetoimittajien laskentaohjelmien perusteella vastaamaan korkean hyötysuhteen pumppua.

Tietokonesalin jäähdytysverkoston pumpun paineenkorotus on 80 kPa. Kaukolämpöverkon paluupuolelle syöttävän pumpun paineenkorotus on 50 kPa ja menopuolelle syöttävän pumpun paineenkorotus 300 kPa.

Tietokonesalin UPS- ja virranjakelulaitteiston yhteiseksi sähkötehoksi (lämmöntuotoksi) on oletettu 4 % tietokonesalin palvelimien tehosta, mikä vastaa energiatehokkaiden sähkölaitteistojen kulutusta.

Kaukolämpöverkon menoveden lämpötilaa säädetään ulkolämpötilasta riippuvan säätökäyrän (Kuva 28) mukaisesti erillisessä sekoituspiirissä [60, s. 335-336]. Tässä työssä ei huomioida muita kaukolämpöverkon säätöön vaikuttavia tekijöitä, kuten akkumulointia, ilmankosteutta tai tuuliolosuhteita, vaan lämpötilan oletetaan riippuvan vain ulkolämpötilasta. Säätökäyrä on Kaukolämmön käsikirjan [60] mallikäyrän mukainen.

Kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilaan vaikuttaa muun muassa menoveden lämpötila, verkoston lämpöhäviöt, asiakaslaitteiden ominaisuudet ja asiakkaiden kulutus [60, s. 335]. Tässä työssä kaukolämmön paluuveden lämpötila vaihtelee välillä 43-53 °C riippuen vallitsevasta ulkolämpötilasta alla olevan kuvaajan (Kuva 28) mukaisesti. Paluuveden lämpötilatiedot on saatu energiayhtiöltä vastaamaan pääkaupunkiseudun verkoston lämpötilaa.



Kuva 28. Kaukolämpöverkon menoveden ( $T_m$ ) ja paluuveden ( $T_p$ ) lämpötila suhteessa vallitsevaan ulkolämpötilaan ( $T_u$ ).

## 7 Tutkimustulokset

Alla olevassa taulukossa on esitetty tämän diplomityön tulokset koottuna. Saadut tutkimustulokset analysoidaan ja esitellään yksityiskohtaisemmin tämän kappaleen tekstiosuudessa.

Taulukko 6. Diplomityön tulokset koottuna

	Vaihtoehto 1 VJK	Vaihtoehto 2 LP 60	Vaihtoehto 3 LP 75	Vaihtoehto 4 LP 90	Vaihtoehto 5 LP Ene
<b>Optimoitavat suuret</b>					
T <sub>ca</sub> (°C)	20 *	20	20	19	20 **
T <sub>ha</sub> (°C)	35 *	35	35	34	35 **
T <sub>cws</sub> (°C)	15 *	17	17	15	17 **
ΔT <sub>cw</sub> (°C)	7 *	9	10	9	9 **
<b>Energiankulutus (kWh/a)</b>					
Q <sub>it</sub> **	26 280 000	26 280 000	26 280 000	26 280 000	26 280 000
Q <sub>fan</sub>	26 280	26 280	26 280	5 256	26 280
Q <sub>cool</sub>	3 102 194	5 403 046	7 129 854	15 776 858	N/A
Q <sub>dc_hvac</sub>	1 079 047	1 137 172	1 168 806	1 152 206	1 051 547
Q <sub>dc_e</sub>	1 051 200	1 051 200	1 051 200	1 051 200	1 051 200
Q <sub>dc_l</sub>	29 792	29 792	29 792	29 792	29 792
<b>Kaukolämpöverkkoon hyödynnetty energia (kWh/a)</b>					
Q <sub>re</sub>	0	30 279 179	31 994 794	40 756 605	N/A ***
<b>Eneriatehokkuuden mittarit</b>					
PUE	1,20	1,29	1,36	1,69	N/A ***
ERE	1,2	0,13	0,14	0,13	N/A ***
ERF	0	0,9	0,9	0,92	N/A ***
<b>Investointikustannukset (€)</b>					
I <sub>cool</sub>	2 040 000	2 310 000	2 460 000	2 860 000	1 560 000
<b>Vuosittaiset kustannukset (€/a)</b>					
I <sub>m</sub>	40 800	46 200	49 200	57 200	31 200
Q <sub>it</sub> *€e	1 768 644	1 768 644	1 768 644	1 768 644	1 768 644
Q <sub>fan</sub> *€e	1 769	1 769	1 769	354	1 769
Q <sub>cool</sub> *€e	208 778	363 625	479 839	1 061 783	0
Q <sub>dc_hvac</sub> *€e	72 620	76 532	78 661	77 543	70 769
Q <sub>dc_e</sub> *€e	70 746	70 746	70 746	70 746	70 746
Q <sub>dc_l</sub> *€e	2 005	2 005	2 005	2 005	2 005
<b>Vuosittaiset tuotot (€/a)</b>					
Q <sub>dc_e</sub> *€re	0	408 844	593 126	1 117 146	0
<b>Elinkaarikustannukset jaoteltuna (€)</b>					

$Im \cdot a'$	512 712	580 570	618 270	718 802	392 074
$Q_{it} \cdot \epsilon \cdot a''$	26 693 880	26 693 880	26 693 880	26 693 880	26 693 880
$Q_{fan} \cdot \epsilon \cdot a''$	26 694	26 694	26 694	5 339	26 694
$Q_{cool} \cdot \epsilon \cdot a''$	3 151 050	5 488 138	7 242 141	16 025 325	0
$Q_{dc\_hvac} \cdot \epsilon \cdot a''$	1 096 041	1 155 081	1 187 213	1 170 352	1 068 108
$Q_{dc\_e} \cdot \epsilon \cdot a''$	1 067 755	1 067 755	1 067 755	1 067 755	1 067 755
$Q_{dc\_l} \cdot \epsilon \cdot a''$	30 261	30 261	30 261	30 261	30 261
<b>Tuotot elinkaaren aikana (€)</b>					
$Q_{dc\_e} \cdot \epsilon \cdot a''$	0	6 170 621	8 951 962	16 860 918	0
<b>Elinkaarikustannukset yhteensä (€)</b>					
<b>LCC</b>	<b>34 618 392</b>	<b>31 181 757</b>	<b>30 374 252</b>	<b>31 710 796</b>	<b>30 838 771</b>

\* Vaihtoehto 1, VJK jäähdytysjärjestelmää ei ole optimoitu, vaan käytetty energiatehokkaalle konesalille tyypillisiä arvoja.

\*\* Vaihtoehto 5, LP Ene ei ole optimoitu, vaan käytetty Vaihtoehto 2, LP 60 arvoja.

\*\*\* Vaihtoehto 5, LP Ene lämpöpumpun käyttämä energia ( $Q_{cool}$ ) ja täten myös hyödynnetyn hukkalämmön määrä ( $Q_{re}$ ) sekä PUE ja ERF riippuvat energiayhtiön investoimasta lämpöpumpusta. Tällä ei kuitenkaan ole vaikutusta tapauksen muuhun energiankulutukseen tai elinkaarikustannuksiin. Myöskään tarkkaa ERE - arvoa ei ole saatavissa, mutta mikäli energiayhtiön oletetaan hyödyntävän kaikki jäähdytysjärjestelmästä saatavissa oleva hukkalämpö, on ERE yhtä suuri kuin muissa lämpöpumppua hyödyntävissä tapauksissa.

## 7.1 Hukkalämmön hyödyntämisen vaikutus energiatehokkuuden mittareihin

### 7.1.1 PUE

PUE (Power Usage Effectiveness) lasketaan kaavalla (4.1):

$$PUE = \frac{E_{tot}}{E_{it}}$$

$E_{tot}$  = tietokonesalin kokonaisenergian kulutus, joka sisältää

tietotekniikkalaitteistot, jäähdytysjärjestelmän, ilmanvaihdon, valaistuksen,

sähkönjakelun, UPS-laitteiston ja muiden tietokonesalia palvelevien järjestelmien energiankulutuksen.

$E_{it}$  = tietokonesalin tietotekniikkalaitteiston energiankulutus

Tietokonesalin jäähdytysjärjestelmän energiankulutus kasvaa, kun jäähdytys tuotetaan jatkuvasti lämpöpumpulla, eikä vapaajäähdytystä hyödynnetä. Tietokonesalin kokonaisenergiankulutus kasvaa tällöin, mikäli ilmanvaihdon, valaistuksen, sähköjakelun, UPS-laitteiston ja muiden tietokonesalia palvelevien järjestelmien energiankulutus ei muutu. Tästä syystä hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkkoon huonontaa konesalin PUE-arvoa verrattuna tilanteeseen, jossa jäähdytys tuotetaan vedenjäähdytyskoneella ja vapaajäähdytystä hyödynnetään olosuhteiden ollessa suotuisat. PUE ei huomio hukkalämmön hyödyntämistä, eikä se siksi ole yksinään sopiva mittari hukkalämpöä hyödyntävän konesalin energiatehokkuuden mittariksi.

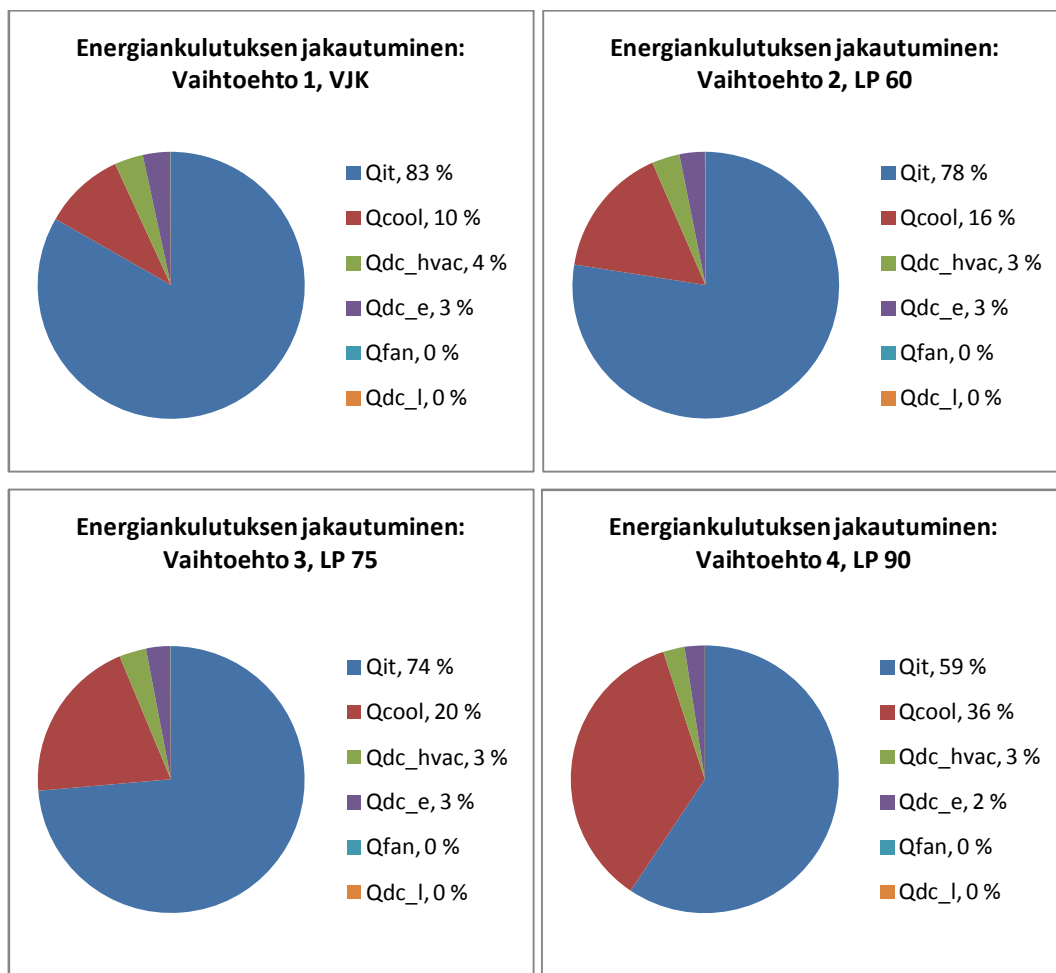
**Taulukko 7. Eri vaihtoehtojen PUE**

	<b>Vaihtoehto 1</b>	<b>Vaihtoehto 2</b>	<b>Vaihtoehto 3</b>	<b>Vaihtoehto 4</b>	<b>Vaihtoehto 5</b>
	<b>VJK</b>	<b>LP 60</b>	<b>LP 75</b>	<b>LP 90</b>	<b>LP ENE</b>
<b>PUE</b>	1,20	1,29	1,36	1,68	N/A

Syötettäessä hukkalämpöä kaukolämpöverkon menopuolelle on lämpöpumpun lämpötilatasojen lämpötilaero suurempi kuin syötettäessä hukkalämpöä kaukolämpöverkon paluupuolelle. Tästä johtuen lämpöpumpun COP on huonompi menopuolelle syötettäessä kaavan (3.5) mukaisesti. Huonompi COP lisää lämpöpumpun energiankulutusta ja täten myös tietokonesalin kokonaisenergiankulutus kasvaa. Suuremmasta kokonaisenergiankulutuksesta johtuen PUE huonompi syötettäessä hukkalämpöä menopuolelle kuin syötettäessä paluupuolelle. Vaihtoehdossa 5 tapauksen PUE-arvo ei ole saatavissa, sillä se riippuu energiayhtiön investoiman lämpöpumpun lämpökertoimesta.

Eri vaihtoehtojen energiankulutuksen jakautuminen on esitetty kuvassa 29. Kuvasta huomataan selkeästi, että jäähdytyksen tuotannon ( $Q_{cool}$ ) osuus on lämpöpumppuratkaisuissa (vaihtoehdot 2-4) suurempi kuin referenssitapauksessa (vaihtoehto 1, VJK). Kuvasta nähdään myös, että lämpöpumppujen

energiankulutus ( $Q_{cool}$ ) on sitä suurempi, mitä korkeampaa lämpötilaa lämpöpumpuilla tuotetaan. Vaihtoehdossa 5 lämpöpumpun energiankulutus  $Q_{cool}$  ei ole saatavissa, sillä se riippuu energiayhtiön investoimasta lämpöpumpusta.



Kuva 29. Energiankulutuksen jakautuminen eri vaihtoehdoissa.

### 7.1.2 ERE

ERE (Energy Reuse Effectiveness) on tällä hetkellä paras mittari hukkalämpöä hyödyntävän tietokonesalin energiatehokkuuden mittari. Vaikka tietokonesalin kokonaisenergiankulutus kasvaa, parantaa (eli pienentää) hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkkoon tietokonesalin ERE -arvoa merkittävästi, sillä ERE ottaa huomioon hyötykäyttöön otetun hukkalämmön määrän.

Referenssitapauksessa, jossa hukkalämpöä ei hyödynnetä, on ERE yhtä suuri kuin PUE.

Vaihtoehdossa 5 tarkkaa ERE -arvoa ei ole saatavissa, mutta mikäli energiayhtiön oletetaan hyödyntävän kaikki jäähdytysjärjestelmästä saatavissa oleva hukkalämpö, on ERE yhtä suuri kuin muissa lämpöpumpun hyödyntävissä tapauksissa.

**Taulukko 8. Eri vaihtoehtojen ERE**

	<b>Vaihtoehto 1</b>	<b>Vaihtoehto 2</b>	<b>Vaihtoehto 3</b>	<b>Vaihtoehto 4</b>	<b>Vaihtoehto 5</b>
	<b>VJK</b>	<b>LP 60</b>	<b>LP 75</b>	<b>LP 90</b>	<b>LP ENE</b>
<b>ERE</b>	1,20	0,13	0,14	0,13	~ 0,13

ERE on käytännössä sama riippumatta siitä syötetäänkö hukkalämpö kaukolämpöverkon meno- vai paluupuolelle. Kaukolämpöverkon syöttöpumppujen energiankulutuksen ja jäähdytysjärjestelmien energiankulutuksen erot aiheuttavat kuitenkin pienen eron järjestelmien välille.

Hukkalämmön hyödyntämisessä käytettävän lämpöpumpun lämpökerroin ei vaikuta EREN arvoon lainkaan. Kaavan (3.1) mukaisesti kaikki kompressorin tekemä työ siirtyy korkeampaan lämpötilaan ja mallin lämpöpumpulla kompressorin mekaaninen hyötysuhde on 1, jolloin lämpöhäviöitä ei esiinny. Todellisuudessa osa lämpöpumpun käyttämästä sähkötehosta muuttuu huonetilaan säteileväksi lämmöksi, jolloin lämpöpumpun lämpökertoimella on pieni vaikutus EREen.

Mielenkiintoista tuloksissa oli se, että pienin eli paras ERE saavutettiin tilanteessa, jossa kuumakäytävän lämpötila, kylmäkäytävän lämpötila ja jäähdytysveden menolämpötila kaikki mahdollisimman matalat. Tämä johtunee siitä, että lämpötilatasojen ollessa matalat tapahtuu tiloista vähemmän lämpöhäviöitä ympäristöön, jolloin suurempi osuus lämmöstä on otettavissa talteen ja hyödynnettävissä kaukolämpöverkkoon.



### 7.1.3 ERF

On selvää, että hukkalämmön hyödyntämisen osuutta mittaava ERF (Energy Reuse Factor) paranee (eli kasvaa) huomattavasti, kun hukkalämpöä hyödynnetään. Referenssikohteessa, jossa hukkalämpöä ei hyödynnetä lainkaan,  $ERF = 0$ .

Taulukko 9. Eri vaihtojen ERF

	Vaihtoehto 1 VJK	Vaihtoehto 2 LP 60	Vaihtoehto 3 LP 75	Vaihtoehto 4 LP 90	Vaihtoehto 5 LP ENE
ERF	0	0,90	0,90	0,92	N/A *

ERF on paras vaihtoehdossa, jossa hukkalämpö syötetään kaukolämpöverkon menopuolelle, koska lämpöpumpun energiankulutuksen ollessa suurempi kasvaa hyödynnettävän hukkalämmön absoluuttinen ja myös suhteellinen osuus kaavan (3.1) mukaisesti. Vaihtoehdossa 5 ERF riippuu energiayhtiön investoiman lämpöpumpun lämpökertoimesta, joten arvoa ei ole saatavissa.

### 7.1.4 Vaikutus muihin energiatehokkuuden mittareihin

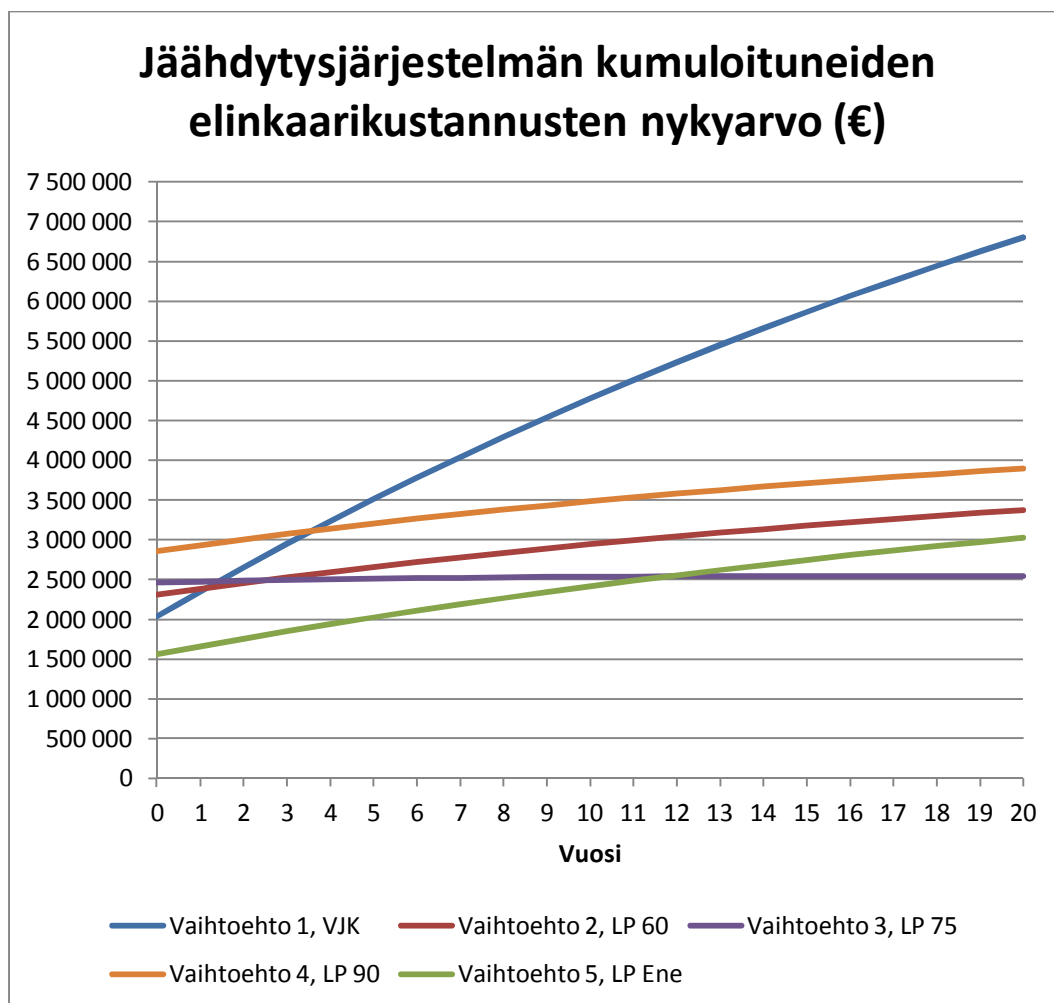
Tietokonesalin **energiatiheys** ja **CUPS** (Computer Units per Second) eivät riipu jäähdytysjärjestelmän energiankäytöstä, eivätkä hukkalämmön hyödyntämisestä, joten hukkalämmön hyödyntäminen ei vaikuta niiden arvoihin.

**CADE** (Corporate Average Data Center Efficiency) ja **DCIE** (Data Center Infrastructure Efficiency) eivät huomioi hukkalämmön hyödyntämistä. Tästä johtuen ne huononevat hukkalämmön hyödyntämisen seurauksena, kun vapaajäähdytystä ei käytetä, jolloin jäähdytysenergiankulutus kasvaa.

Hukkalämmön hyödyntämisen huomioiva **DCNE** (Data Center Infrastructure Efficiency) paranee EREn tavoin, kun hukkalämpöä otetaan talteen ja käytetään uudelleen.

## 7.2 Hukkalämmön hyödyntämisen vaikutus elinkaarikustannuksiin

Alla olevassa kuvassa (Kuva 30) on esitetty eri jäähdytysjärjestelmävaihtoehtojen kumuloituneet elinkaarikustannukset nykyarvossa. Kuvaajista on poistettu palvelimien energiankulutuksen perusosa ilman tuulettimien energiankulutusta, UPS-laitteiston energiankulutus ja konesalin valaistuksen energiankulutus, jotka pysyvät vakiona tapauksesta riippumatta. Kuvaaja sisältää siis lämpöpumpun tai vedenjäähdytyskoneen ja lauhduttimen, pumppujen, CRAHien ja palvelimien imutuulettimien energiankulutuksen kustannukset sekä myydystä lämmöstä saatavat tuotot, jotka muuttuvat jäähdytysratkaisun ja optimoitavien muuttujien mukaisesti.



Kuva 30. Eri jäähdytysjärjestelmien kumuloituneiden elinkaarikustannusten nykyarvo (€).

Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkkoon lämpöpumpun avulla tuo kaikissa vaihtoehdoissa miljoonien säästöt elinkaaren aikana.

Elinkaarikustannuksiltaan edullisimmaksi osoittautui vaihtoehto 3, jossa lämpöpumpulla on mahdollista tuottaa maksimissaan 75 °C lämpöä. Hukkalämpö syötetään kaukolämpöverkon menopuolelle, kun menopuolen lämpötila on 75 °C, eli kun ulkolämpötila on yli 5 °C. Jäähdytysjärjestelmän elinkaarikustannukset eivät juurikaan kasva investoinnin jälkeen. Tässä tapauksessa lämmön myymisestä saadut tuotot ovat lähes samansuuruiset kun lämpöpumpun, CRAHien, pumppujen ja palvelimien tuulettimien yhteenlasketut energiakustannukset. Tämä ratkaisu on elinkaarikustannuksiltaan yli 4,2 miljoonaa euroa edullisempi kuin referenssitapauksen (vaihtoehto 1) vedenjäähdytyskoneilla ja lauhduttimilla tuotettava jäähdytys. Vaihtoehdon 3 jäähdytysjärjestelmän elinkaarikustannukset ovat 63 % referenssitapausta pienemmät.

Vaihtoehdossa 3 (LP 75) järjestelmän investointikustannukset ovat 420 000 euroa referenssitapausta kalliimmat, mutta lisäinvestointi maksaa itsensä takaisin alle kahdessa vuodessa hukkalämmön myynnistä saatavilla tuotoilla. Jo kolmessa vuodessa vaihtoehto 3 (LP 75) tulee edullisemmaksi kuin investointikustannuksiltaan edullisempi vaihtoehto 2 (LP 60), jossa hukkalämpöä hyödynnetään vain kaukolämpöverkon paluupuolelle. Vaihtoehto 5 on elinkaarikustannuksiltaan edullisin 11. vuoteen asti, jota pidemmällä tarkastelujaksolla vaihtoehto 3 on edullisin.

Elinkaarikustannuksiltaan toiseksi edullisimmaksi osoittautui vaihtoehto 5, jossa energiayhtiö maksaa lämpöpumpun investoinnin ja sen kuluttaman sähköenergian, mutta energiayhtiö ei maksa hyödynnettävästä lämmöstä korvausta konesalitoimijalle. Vaihtoehto 5 on lisäksi investointikustannuksiltaan edullisin vaihtoehto, sillä energiayhtiö kustantaa lämpöpumpun investoinnin. Vaihtoehto 5 on elinkaarikustannuksiltaan lähes 3,8 miljoonaa euroa referenssitapausta edullisempi, mutta noin 465 000 euroa vaihtoehtoa 3 kalliimpi ratkaisu.

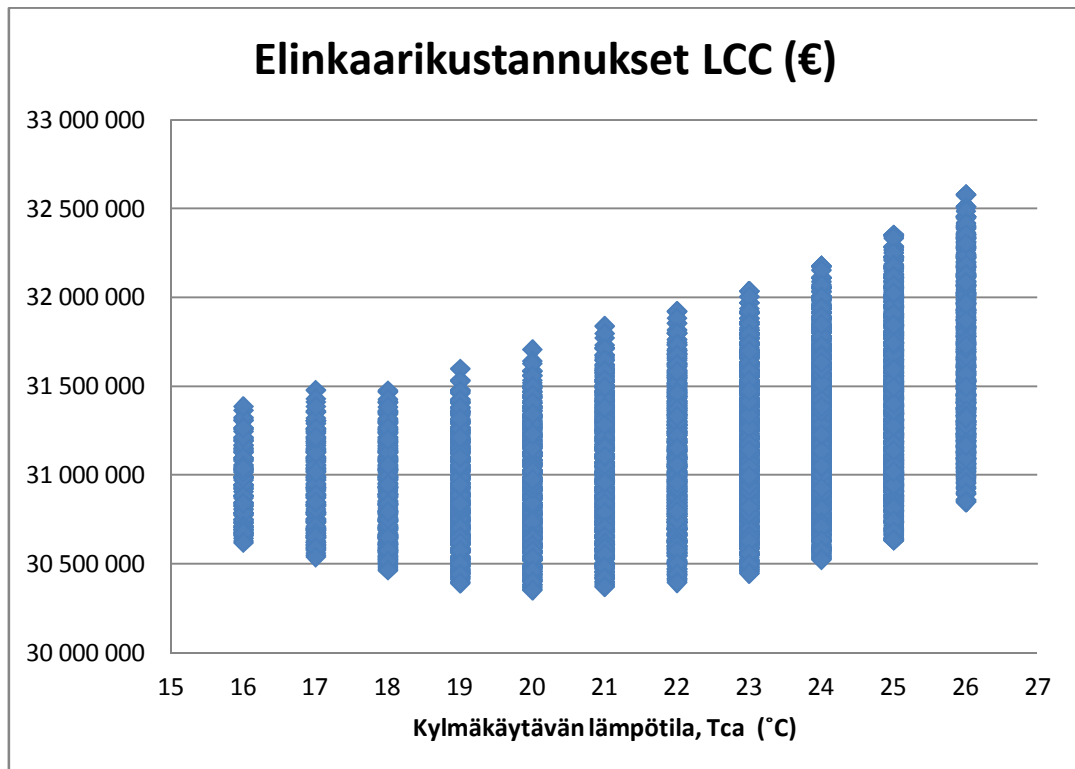
Lämpöpumppujärjestelmien investointikustannukset ovat vaihtoehdoissa 2 (LP 60), 3 (LP 75) ja 4 (LP 90) referenssitapauksen vedenjäähdytyskonetta kalliimmat, mutta lisäinvestoinnit maksavat itsensä kaikissa tapauksissa alle neljässä vuodessa takaisin kaukolämpöverkkoon myydystä energiasta saatavilla tuotoilla.

Kuvaajasta huomataan, että vaihtoehdossa 2 (LP 60) ja vaihtoehdossa 4 (LP 90) elinkaarikustannukset kasvavat lähes samaa tahtia. Vaihtoehdossa 4 (LP 90) kaukolämpöverkon menopuolelle myytävästä lämmöstä maksetaan tuplahintaa vaihtoehdon 2 (LP 60) kaukolämpöverkon paluupuolelle myytävään lämpöön nähden, mutta korkeamman syöttölämpötilan ansiosta lämpöpumpun lämpökerroin on noin puolet huonompi, joten se kuluttaa noin tuplasti sähköä. Vaihtoehto 4 (LP 90) osoittautuikin huonon lämpökertoimen ansiosta elinkaarikustannuksiltaan kalleimmaksi lämpöpumppuratkaisuksi, ollen kuitenkin yli 2,9 miljoonaa euroa referenssitapausta (vaihtoehto 1, VJK) edullisempi.

## **7.3 Muuttujien vaikutus elinkaarikustannuksiin**

### **7.3.1 $T_{ca}$ kylmäkäytävän lämpötila**

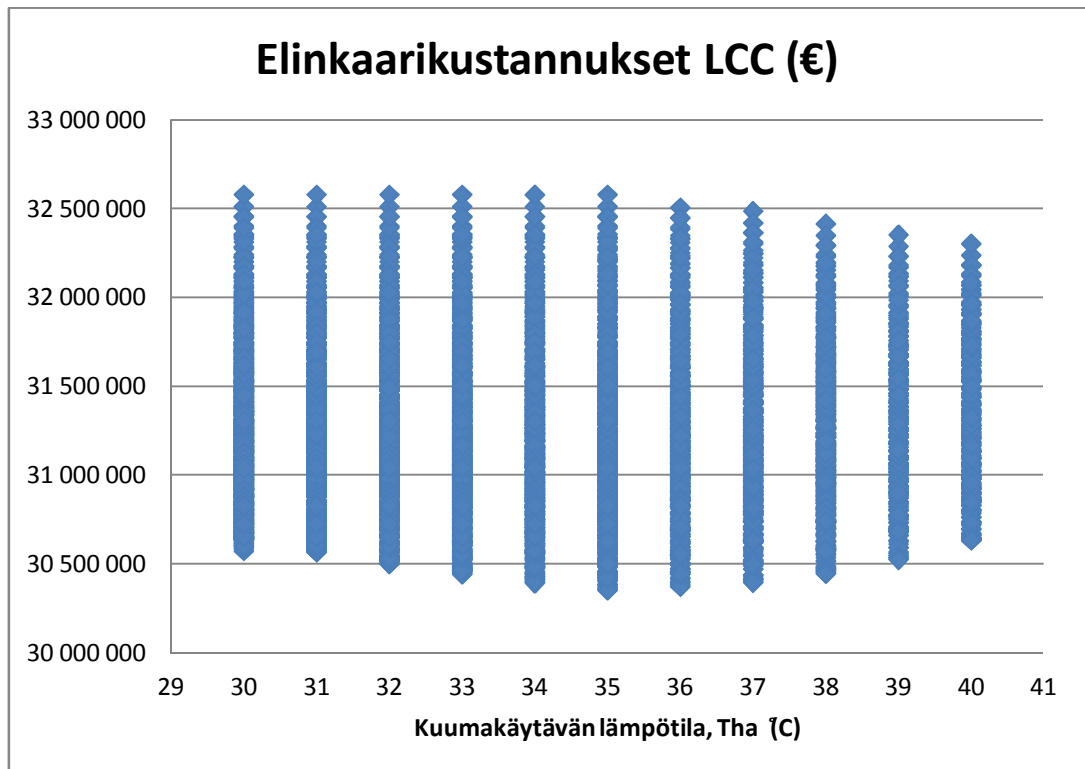
Kylmäkäytävän lämpötilan nosto mahdollistaa lämpimämmän jäähdytyksen menoveden lämpötilan, mikä parantaa lämpöpumpun lämpökerrointa ja pienentää sen energiankulutusta. Kylmäkäytävän lämpötilan nosto yli 18 °C kasvattaa kuitenkin palvelimien ja palvelimien imutuulettimien energiankäyttöä eksponentiaalisesti kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 31. Kylmäkäytävän lämpötilan vaikutus elinkaarikustannuksiin vaihtoehdossa 3 (LP 75)

### 7.3.2 $T_{ha}$ kuumakäytävän lämpötila

Kuumakäytävän ja kylmäkäytävän suurempi lämpötilaero pienentää CRAHin puhaltimen energiankulutusta eksponentiaalisesti. Kuumakäytävän lämpötilaa ei kuitenkaan voida nostaa rajattomasti, sillä liian suuri kylmä- ja kuumakäytävän välinen lämpötilaero aiheuttaa kuuman ilman takaisinvirtausta, ilmavirtojen sekoittumista ja kuumien pisteiden syntyä palvelinkaappeihin. Tästä johtuen kuuma- ja kylmäkäytävän välinen lämpötilaero on rajoitettu olemaan enimmillään 15 °C, mikä on todettu todellisissa kohteissa olevan maksimi ilman lämpenemä, jolla edellä mainituilta ongelmilta vältytään.

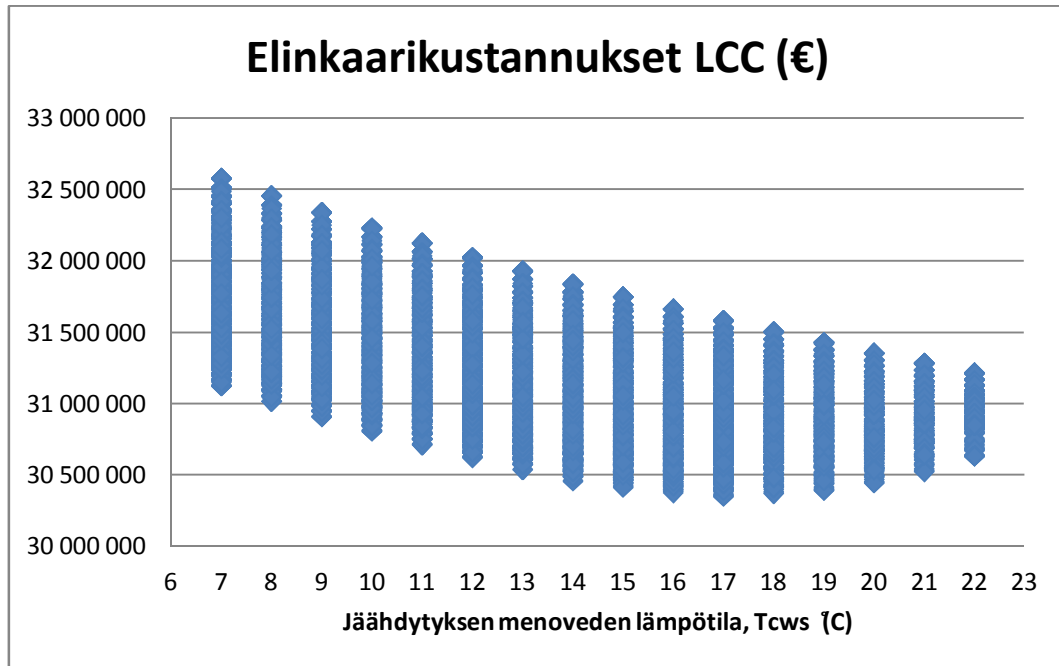


Kuva 32. Kuumakäytävän lämpötilan vaikutus elinkaarikustannuksiin vaihtoehdossa 3 (LP 75)

### 7.3.3 $T_{cws}$ jäähdytyksen menoveden lämpötila

Tavallisessa vedenjäähdytyskoneella ja lauhduttimilla toteutettavassa jäähdytysratkaisussa jäähdytyksen menoveden lämpötilan nosto tuo energiansäästöä ennen kaikkea kasvavan vapaajäähdytyskauden ansiosta. Lämpöpumppuratkaisuissa ei kuitenkaan hyödynnetä vapaajäähdytystä, joten siitä ei tule energiansäästöä. Sen sijaan korkeampi jäähdytyksen menoveden lämpötila parantaa lämpöpumpun lämpökerrointa kaavan (3.5) mukaisesti, mikä pienentää lämpöpumpun energiankulutusta.

Jäähdytysveden menolämpötilan nostoa kuitenkin rajoittaa saavutettavissa oleva kylmäkäytävän lämpötila rajoitusehdon (5.6) mukaisesti. Tästä ja kappaleessa 2.3.1.1 sekä kuvassa 8 esitetystä palvelimien energiankulutuksen noususta kylmäkäytävän lämpötilan noustessa johtuen palvelimien ja niiden imutuulettimien energiankulutus alkaa kasvaa eksponentiaalisesti, kun jäähdytysveden menolämpötila ylittää 15 °C.



Kuva 33. Jäähdytyksen menoveden lämpötilan vaikutus elinkaarikustannuksiin vaihtoehdossa 3 (LP 75)

### 7.3.4 $\Delta T_{cw}$ jäähdytyksen paluu- ja menoveden lämpötilaero

Vastaavasti kuin CRAHin ilmapuolelle, pätee CRAHin jäähdytyspatterin jäähdytysteholle:

$$Q_{cool\_w} = \rho_w V_w c_{pw} \Delta t_{cw} = \rho_w V_w c_{pw} (t_{cwr} - t_{cws}) \quad (7.1)$$

jossa  $\rho_w$  on nesteen tiheys,  $V_w$  nesteen tilavuusvirta,  $c_{pw}$  nesteen ominaislämpökapasiteetti,  $\Delta t_{cw}$  jäähdytyspatterin meno- ja paluunesteen lämpötilaero,  $t_{cwr}$  jäähdytyspatterin paluunesteen lämpötila ja  $t_{cws}$  jäähdytyspatterille menevän nesteen lämpötila.

CRAHin jäähdytysteho, nesteen tiheys sekä ominaislämpökapasiteetti pysyvät likimain vakiona, joten

$$V_w (\Delta t_{cw}) \approx \text{vakio} \quad (7.2)$$

, mistä seuraa riippuvuus:

$$V_w \sim \frac{1}{\Delta t_{cw}} \quad (7.3)$$

Jäähdytyspiirin pumpulle pätevät samat affiniteettilait kuin CRAHin puhaltimelle, mikäli verkosto ei muutu. Tällöin pätee:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^3 \quad (7.4)$$

,missä  $V_n$  on pumpun tilavuusvirta ja  $P_n$  pumpun teho.

Kuitenkin kun oletetaan, että jäähdytysverkosto ja sen komponentit mitoitetaan tapauskohtaisesti painehäviön perusteella, voidaan olettaa, että jäähdytysverkon pumpun paineenkorotus pysyy vakiona.

Pumpun pumppausteho lasketaan kaavalla:

$$P = \Delta p * V \quad (7.5)$$

, jossa  $\Delta p$  on pumpun paineenkorotus ja  $V$  tilavuusvirta.

Tällöin pumpun tehontarpeen ja tilavuusvirran välinen riippuvuus voidaan esittää seuraavasti:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (7.6)$$

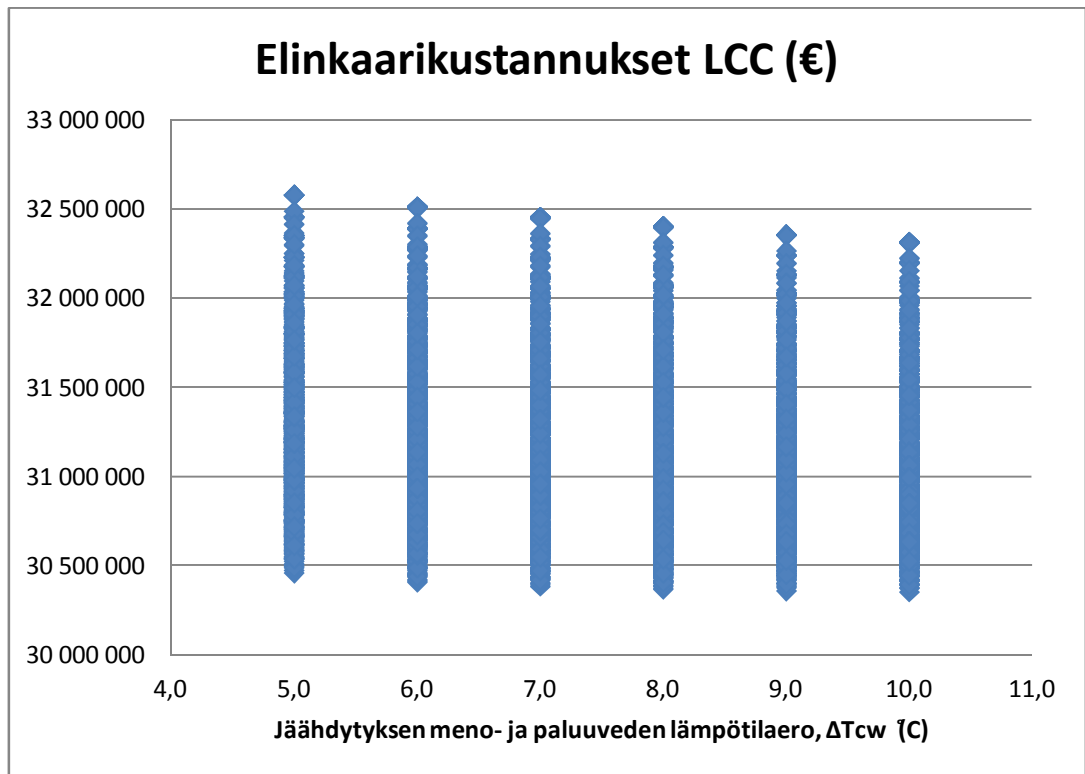
, siis

$$\frac{P_1}{P_2} \approx \frac{\Delta t_{cw2}}{\Delta t_{cw1}} \quad (7.7)$$

Tästä johtuen mitä suurempi jäähdytyspatterin meno- ja paluupuolen lämpötilaero on, sitä pienempi jäähdytyspiirin pumpun energiankulutus.

Jäähdytyksen meno- ja paluuverkon lämpötilaeron vaikutus järjestelmän elinkaarikustannuksiin on pienempi kuin muiden optimoitavien suureiden vaikutus.





Kuva 34. Jäähdytyksen meno- ja paluuveden lämpötilaeron vaikutus elinkaarikustannuksiin vaihtoehdossa 3 (LP 75)

## 8 Johtopäätökset

Tulosten perusteella tietokonesalien hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpun avulla kaukolämpöverkkoon tuo miljoonien säästöt elinkaarikustannuksissa sekä parantaa merkittävästi tietokonesalin energiatehokkuutta.

Saatujen tulosten perusteella elinkaarikustannuksiltaan edullisimmaksi ratkaisuksi osoittautui vaihtoehto 3 (LP 75), eli järjestelmä, jossa hukkalämpö hyödynnetään kaukolämpöverkon lämpötilan mukaan kesäisin kaukolämpöverkon menopuolelle ja talvisin paluupuolelle. Elinkaarikustannuksiltaan edullisimmalla vaihtoehdolla saavutetaan yli 4,2 miljoonan euron säästöt elinkaarikustannuksissa verrattuna referenssitapaukseen, jossa jäähdytys toteutetaan vapaajäähdytystä hyödyntävällä vedenjäähdytyskoneella. Elinkaarikustannuksiltaan edullisimmassa vaihtoehdossa pelkän jäähdytysjärjestelmän elinkaarikustannukset ovat 63 % referenssitapausta pienemmät.

Myös vaihtoehdot, joissa hukkalämpö hyödynnetään lämpöpumpun avulla vain joko kaukolämpöverkon paluupuolelle tai menopuolelle tuottavat elinkaarikustannuksissa miljoonien säästöt verrattuna referenssitapaukseen nähden.

Kaikissa lämpöpumppuratkaisuissa energiatehokkuutta mittaavat ERE ja ERF -arvot ovat merkittävästi paremmat kuin referenssitapauksessa, sillä ERE ja ERF huomioivat hukkalämmön hyödyntämisen energiatehokkuutta parantavana tekijänä. Sen sijaan lämpöpumppujärjestelmän PUE -arvo on lämpöpumppuratkaisuissa referenssitapausta huonompi, sillä PUE ei huomioi hukkalämmön hyödyntämistä.

Malleissa, joissa hukkalämpö hyödynnetään lämpöpumpun avulla kaukolämpöverkkoon, kylmäkäytävän lämpötila kannattaa asettaa 19-20 °C, kuumakäytävän lämpötila 34-35 °C, jäähdytyksen menoveden lämpötila 15-17 °C ja jäähdytyksen meno- ja paluuveden lämpötilaero 9-10 °C asetusravoon.

## Lähteet

---

1. Koomey, Jonathan. Growth in data center electricity use 2005 to 2010. Analytical Press. Oakland, California, Yhdysvallat. 2011. 24 s. [Viitattu 5.5.2015]. Saatavissa: [http://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/MC/Home/Files/PDFs/Koomey\\_Data\\_Center.pdf](http://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/MC/Home/Files/PDFs/Koomey_Data_Center.pdf)
2. Energiatehokas tietokonesali. Motiva Oy. 2011. [Viitattu 5.5.2015] Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas\\_konesali.pdf](http://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas_konesali.pdf)
3. DCD Industry Census 2013: Power. Is the industry getting better at using power? DatacenterDynamics Focus. 2014. Volume 2, Issue 33. [verkkolehti] s. 16-17. [Viitattu 24.11.2015] Saatavissa: <http://content.yudu.com/Library/A2nvau/FocusVolume3issue33/resources/index.htm>
4. Lu, Tao & Lü, Xiaoshu & Remes, Matias & Viljanen, Martti. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study. Energy and Buildings [verkkolehti]. Volume 43, Issue 12. 2011. S. 3360-3372. [Viitattu 4.3.2015] doi:10.1016/j.enbuild.2011.08.034
5. Hajanti, Petteri. Palvelinkeskuksen jäähdytysjärjestelmän teknis-taloudellinen optimointi. 2013. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. 125 s.
6. Rasmussen, Neil. Guidelines for Specification of Data Center Power Density. APC White Paper #120. 2005. 21 s.
7. Data Center Site Infrastructure Tier Standard: Topology. Uptime Institute. 2012. 12 s. [Viitattu 20.11.2015] Saatavissa: [http://www.gpxglobal.net/wp-content/uploads/2012/10/TIERSTANDARD\\_Topology\\_120801.pdf](http://www.gpxglobal.net/wp-content/uploads/2012/10/TIERSTANDARD_Topology_120801.pdf)
8. Data Center Networking Equipment – Issues and Best Practices. White paper prepared by ASHRAE Technical Committee TC 9.9. Yhdysvallat. American

---

Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2012. 43 s.

9. Garnier, Christophe. Data Centre Life Cycle Assessment Guidelines. 2012. The Green Grid. White Paper. 28 s. [Viitattu 24.11.2015] Saatavissa: <http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/WP45v2DataCentreLifeCycleAssessmentGuidelines.pdf>.

10. 2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance. White paper prepared by ASHRAE Technical Committee TC 9.9. Yhdysvallat. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2011. 45 s.

11. ETSI 300 019-1-3. Environmental Engineering (EE); Environmental conditions and environmental tests for telecommunications equipment; Part 1-3: Classification of environmental conditions; Stationary use at weather protected locations. V2.4.1. Ranska. European Telecommunications Standards Institute. 2014. 21 s.

12. Sumper, Andreas & Baggini, Angelo. Electrical energy efficiency : Technologies and applications. John Wiley and sons, Ltd. 2012. 434 s. ISBN: 978-0-470-97551-0.

13. Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaopas. Ympäristöministeriö. 2011. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BB9D6D2F2-A816-4ECF-BE33-B8D56869253D%7D/30752>

14. Selvitys IT-ympäristön sähkönsäästökeinoista. tietokonesalipalvelujen energiatehokkuuden periaatteet. Motiva Oy. 2010. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/4427/Konesalipalvelujen\\_energiatehokkuuden\\_periaatteet.pdf](http://www.motiva.fi/files/4427/Konesalipalvelujen_energiatehokkuuden_periaatteet.pdf)

15. Kiinteistöjen kaukojäähdytys yleistyy. Yle. 2013. [Viitattu 26.8.2015]. Uutinen. Saatavissa: [http://yle.fi/uutiset/kiinteistojen\\_kaukojaahdytys\\_yleistyy/6638032](http://yle.fi/uutiset/kiinteistojen_kaukojaahdytys_yleistyy/6638032)

- 
16. Kaukojäähdytys. Raportti J1/2004. 2004. Suomen Kaukolämpö ry. ISSN 1795-0627 (painettu), ISSN 1795-0635 (verkkojulkaisu). Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/raporttij1\\_2004.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/raporttij1_2004.pdf)
17. Rakennusten kaukojäähdytys: Yhtenäiset laatuvaatimukset, suositukset ja ohjeet. Energiateollisuus ry. 2014. Luonnos. [Viitattu 26.8.2015]. Saatavissa: [http://www.sulvi.fi/wp-content/uploads/2014/07/J1\\_Luonnos\\_20140701.pdf](http://www.sulvi.fi/wp-content/uploads/2014/07/J1_Luonnos_20140701.pdf)
18. Bruschi, John & Rumsey, Peter & Anliker, Robin & Chu, Larry & Gregson, Stuart. FEMP Best Practices Guide for Energy-Efficient Data Center Design. U.S. Department of Energy. 2011. DOE/GO-102010-2956. Saatavissa: <http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/eedatacenterbestpractices.pdf>
19. Marcinichen, J. B. & Olivier, J. A. & Thome, J. R. On-chip two-phase cooling of datacenters: Cooling system and energy recovery evaluation., Applied Thermal Engineering [verkkolehti]. Volume 41. 2012. S. 36-51, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2011.12.008
20. Zimmermann, Severin & Meijer, Ingmar & Tiwari, Manish K. & Paredes, Stephan & Michel, Bruno & Poulikakos, Dimos. Aquasar: A hot water cooled data center with direct energy reuse. Energy [verkkolehti]. Volume 43, Issue 1. 2012. S. 237-245. DOI:10.1016/j.energy.2012.04.037
21. Sorvari, Jaakko. Konesalin ylijäämälämmön hyödyntäminen Levin Koutalaella. 2015. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. 99 s.
22. Tehot irti elektroniikasta uudella jäähdytyslaitteella. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2013. [Viitattu 26.8.2015]. Uutinen. Saatavissa: [http://www.lut.fi/uutiset/-/asset\\_publisher/h33vOeufOQWn/content/tehot-irti-elektroniikasta-uudella-jaahdytyslaitteella](http://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/tehot-irti-elektroniikasta-uudella-jaahdytyslaitteella)
23. Faster and cheaper technique to cool electronic systems developed. National University of Singapore. ScienceDaily. 2013. [Viitattu 26.8.2015]. Saatavissa: [www.sciencedaily.com/releases/2013/11/131119082739.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2013/11/131119082739.htm)

- 
24. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen, Ylijäämälämpöenergia-analyysit. Motiva Oy. 2014. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/8899/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_-\\_ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf](http://www.motiva.fi/files/8899/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_-_ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf)
25. Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä. YIT Teollisuus- ja verkkopalvelut Oy. 2010. [Viitattu 26.8.2014]. Energiateollisuus ry:n ja työ- ja elinkeinoministeriön toimeksianto. Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/teollisuuden\\_ylijaamalammon\\_hyodyntaminen\\_kaukolammityksessa\\_yit2010.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/teollisuuden_ylijaamalammon_hyodyntaminen_kaukolammityksessa_yit2010.pdf)
26. Rajjas, Antti. Konesalin hukkalammon hyödyntämismahdollisuudet toimistorakennuksessa. 2012. Opinnäytetyö. 48 s. [Viitattu 21.11.2015]. Saatavissa: <http://publications.theseus.fi/handle/10024/42903>.
27. Kupiainen, Mirva. Lämpöpumppu konesalin jäähdytyksessä ja lämmöntalteenotossa. 2014. Opinnäytetyö. [Viitattu 21.11.2015]. 70 s. Saatavissa: [https://theseus.fi/bitstream/handle/10024/84292/Kupiainen\\_Mirva.pdf](https://theseus.fi/bitstream/handle/10024/84292/Kupiainen_Mirva.pdf)
28. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen, Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset. Motiva Oy. 2014. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/8900/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_lampopumppu\\_ORC\\_www.pdf](http://www.motiva.fi/files/8900/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_lampopumppu_ORC_www.pdf)
29. Happonen, Taito. Ilmalämpöpumpun toiminta ja asennus. 2010. Itä-Suomen yliopisto. ISBN 978-952-61-0044-9. [Viitattu 2.3.2015]. Saatavissa: [http://epublications.uef.fi/pub/urn\\_isbn\\_978-952-61-0044-9/urn\\_isbn\\_978-952-61-0044-9.pdf](http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-0044-9/urn_isbn_978-952-61-0044-9.pdf)
30. Chua K.J. & Chou S.K. & Yang W.M. Advances in heat pump systems: A review. Applied Energy. Volume 87, Issue 12. 2010. S. 3611-3624. DOI:10.1016/j.apenergy.2010.06.014.

- 
31. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Motiva Oy. 2013. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon\\_hukkalampo\\_hyodyksi.pdf](http://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf)
32. 2000 neliötä ja kaukojäähdytys: DNA:lta palvelinsali Helsinkiin. Digitoday. 2013. Uutinen. [Viitattu 26.8.2015]. Saatavissa: <http://www.digitoday.fi/data/2013/05/28/2000-neliota-ja-kaukojaahdytys-dnalta-palvelinsali-helsinkiin/20137547/66>
33. Academica avaa tänään 5000 m<sup>2</sup> tietokonesalin Suvilahteen. Epressi. 2011. Tiedote. [Viitattu 26.8.2015]. Saatavissa: <http://www.epressi.com/tiedotteet/energia/academica-avaa-tanaan-5000-m2-konesalin-suvilahteen.html>
34. Energiavuosi 2013 – Kaukolämpö. Energiateollisuus ry. 2014. Kalvosarja. [Viitattu 26.8.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/kalvosarjat/energiavuosi-2013-kaukol-mp>
35. Lämmön pientuotannon ja pienimuotoisen ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämpötoiminnassa. Gaia Consulting Oy. 2014. Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/lammon\\_pientuotannon\\_ja\\_ylijaamalammon\\_hyodyntaminen\\_kaukolampotoiminnassa20141215\\_.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/lammon_pientuotannon_ja_ylijaamalammon_hyodyntaminen_kaukolampotoiminnassa20141215_.pdf)
36. Tietokonesali alkaa lämmittää espoolaiskoteja. Tekniikka ja Talous. 2010. Uutinen. [Viitattu 26.8.2015]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/tietokonesali+alkaa+lammittaa+espoolaiskoteja/a541640>
37. Jokela, Esa. Lämpöpumppujärjestelmien vaikutus energiayhtiön Liiketoimintaan. 2014. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22560/Jokela.pdf>
38. Woodruff, J. Zachary & Brenner, Paul & Buccellato, Aimee P.C & Go, David B. Environmentally opportunistic computing: A distributed waste heat reutilization approach to energy-efficient buildings and data centers. Energy and

---

Buildings [verkkolehti]. Volume 69. 2014. S. 41-50. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.036

39. Ebrahimi, Khosrow & Jones, Gerard F. & Fleischer, Amy S. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. Renewable and Sustainable Energy Reviews [verkkolehti]. Volume 31. 2014, S. 622-638. DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.007.

40. Koljonen, Tiina & Sipilä, Kari. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuslaitos VTT. 1998. 55 s. VTT tiedotteita 1926. ISBN: 9513853349.

41. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Motiva Oy. 2013. Saatavissa:

[http://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon\\_hukkalampo\\_hyodyksi.pdf](http://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf)

42. US Environmental Protection Agency: Organic Rankine Cycle: Waste Heat Power Generation.

[http://www.epa.gov/chp/documents/meeting\\_100511\\_ronzello.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/meeting_100511_ronzello.pdf)

43. U.S Department of Energy: Waste Heat Recovery: Technologies and Opportunities in U.S. Industry. 2008. 112 s.

44. Lindell, Ismo. 1994. Sähkötekniikan historia. Tampere: Otatieto Oy. 377 s.

45. Ranne, Aulis. Multi Supply Plant - Sähkö ja vesi. VTT tiedotteita 2060. 2000. Espoo

46. Joshi, Yogendra & Kumar, Pramod. Energy efficient thermal management of data centers / edited by Yogendra Joshi, Pramod Kumar. New York ; Springer, 2012 ISBN 9781441971241.

47. Usage and public reporting guidelines for the Green Grid's infrastructure metrics (PUE/DCiE). The Green Grid. 2009. 15 s. [Viitattu 4.1.2015]. Saatavissa: <http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/White%20Paper%2022%20%20PUE%20DCiE%20Usage%20Guidelinesfinalv21.ashx?lang=en>



- 
48. PUE™: a comprehensive examination of the metric. The Green Grid. 2012. 83 s. [Viitattu 4.1.2015]. Saatavissa: [http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/WP49-PUE%20A%20Comprehensive%20Examination%20of%20the%20Metric\\_v6.pdf?lang=en](http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/WP49-PUE%20A%20Comprehensive%20Examination%20of%20the%20Metric_v6.pdf?lang=en)
49. Gemma, Brady & Kapur, Nikil & Summers, Jonathan & Thompson, Harvey. A Case Study and Critical Assessment in Calculating Power Usage Effectiveness for a Data Centre. *Energy Conversion & Management*, 76. 2013. S. 155-161.
50. Patterson, Mike. ERE: a metric for measuring the benefit of reuse energy from a data center. The Green Grid. 2010. 15 s. [Viitattu 4.1.2015]. Saatavissa: [http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/ERE\\_WP\\_101510\\_v2.ashx?lang=en](http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/ERE_WP_101510_v2.ashx?lang=en)
51. James M. Kaplan, William Forrest, Noah Kindler. Revolutionizing Data Center Energy Efficiency. Raportti. McKinsey. 2008. Saatavissa: [http://www.mckinsey.com/client-service/bto/pointofview/pdf/revolutionizing\\_data\\_center\\_efficiency.pdf](http://www.mckinsey.com/client-service/bto/pointofview/pdf/revolutionizing_data_center_efficiency.pdf).
52. Sirén, Kai. Lyhyt johdatus rakennusten energioptimointiin. 2012. Aalto yliopisto. 34 s.
53. Siren, Kai. Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta. 2014. Aalto yliopisto. 29 s.
54. IDA Indoor Climate and Energy. EQUA Simulation AB. 2 s. [Viitattu 5.11.2014]. Tuote-esite. Saatavissa: [http://www.equa.se/images/building/pdf/IDA\\_ICE\\_\\_brochure.pdf](http://www.equa.se/images/building/pdf/IDA_ICE__brochure.pdf)
55. User Manual, IDA Indoor Climate and Energy. EQUA Simulation AB, 2013. 179 s. [Viitattu 5.11.2014]. Saatavissa: <http://www.equa.se/deliv/ICE45eng.pdf>
56. Palonen, Matti & Hamdy, Mohamed & Hasan, Ala. MOBO a new software for multi-objective building performance optimization. Proceedings of the 13th

---

International Conference of the IBPSA. 2013. Saatavissa:  
[http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p\\_1489.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1489.pdf)

57. Tilastokeskus, Suomen virallinen tilasto (SVT): Kuluttajahintaindeksi [verkkojulkaisu]. ISSN=1796-3524. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 29.7.2015]. Saatavissa: [http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_hin\\_\\_khi/](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__hin__khi/)

58. Työ- ja elinkeinoministeriö, Energiateollisuus ry. Kaukolämmön asema Suomen energiajärjestelmässä tulevaisuudessa. Loppuraportti 2011. 61 s.

59. Tilastokeskus, Tilasto: Energian hinnat [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-7984. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 29.7.2015]. Saatavissa: [http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ene\\_\\_ehi/](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehi/)

60. Koskelainen, Lasse & Saarela, Lauri & Sipilä, Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki. Adato Energia. 566 s. ISBN: 9789525615081